МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ПРОМИСЛОВОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
АНТК ім. О.К. АНТОНОВА




# МАТЕРІАЛИ

## IX Міжнародної науково-технічної конференції

## “АВІА-2009”

21-23 вересня

## ТОМ І

Київ 2009

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
МІНІСТЕРСТВО ПРОМИСЛОВОЇ ПОЛІТИКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
АНТК ім. О.К. АНТОНОВА

# МАТЕРІАЛИ IX МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ „АВІА-2009”

21-23 вересня

**Том 1**

**Київ 2009**

УДК 629.735.01/02(045)

Том 1: Матеріали IX міжнародної науково-технічної конференції „АВІА-2009”. –Т.1. –К.:НАУ, 2009.

**РОБОЧИЙ ОРГКОМІТЕТ**

| | |
|---|---|
| ***Голова оргкомітету*** **Кулик М.С.** | Ректор Національного авіаційного університету |
| ***Заступник голови*** **Харченко В.П.** | Проректор університету з наукової роботи |
| ***Члени оргкомітету:*** | |
| **Васильєв В.М.** | Директор Інституту аеронавігації |
| **Гудманян А.Г.** | Директор Гуманітарного інституту |
| **Дьомін О.О.** | Директор Інституту міжнародних відносин |
| **Жуков І.А.** | Директор Інституту комп’ютерних технологій |
| **Запорожець О.І.** | Директор Інституту міського господарства |
| **Матвєєв В.В.** | Директор Інституту економіки та менеджменту |
| **Свірко В.О.** | Директор Українського НДІ дизайну та ергономіки |
| **Синєглазов В.М.** | Директор Інституту електроніки та систем управління |
| **Суслова Г.А.** | Заступник директора інституту ІСАО |
| **Фузік М.І.** | Директор НДІ Інтегрованих телекомунікаційних технологій |
| **Філоненко С.Ф.** | Директор Інституту інформаційно-діагностичних систем |
| **Шмаров В.М.** | Директор Аерокосмічного інституту |
| **Шинкарук В.Д.** | Директор Інституту повітряного і космічного права та масових комунікацій |
| ***Секретаріат конференції*** | |
| ***Голова секретаріату*** | |
| **Зайцев Ю.В.** | Начальник відділу НТІ |
| ***Члени секретаріату:*** | |
| **Газдюк Р.В.** | Співробітник відділу НТІ |
| **Шепель О.Ю.** | Співробітник відділу НТІ |
| **Рибалко О.Л.** | Співробітник відділу НТІ |
| **Ільченко В.М.** | Помічник проректора з наукової роботи |
| **Корбут Л.А.** | Начальник відділу науково-методичного забезпечення діяльності |

За науковий зміст викладеного матеріалу відповідають автори.

## ПЕРЕЛІК І ЗМІСТ ТОМІВ


***ТОМ І***

***Секція 1. Вимірювання, контроль, діагностика***

***Секція 2. Інформаційна безпека***

***Секція 3. Спеціалізовані комп'ютерні системи та CALS-технології***

***Секція 4. Математичне моделювання та чисельні методи***

***Секція 5. Комп'ютерні технології***

***Секція 6. Аеронавігація***

***Секція 7. Аерокосмічні системи моніторингу та управління***

***ТОМ ІІ***

***Секція 8. Автоматизовані системи управління технологічними процесами***

***Секція 9. Керування складними системами***

***Секція 10. Моделювання в електротехніці, електроніці та світлотехніці***

***Секція 11. Електродинамічні та електронні системи***

***Секція 12. Радіоелектронні комплекси та авіоніка***

***Секція 13. Енергетичні установки***

***Секція 14. Новітні триботехнології***

***Секція 15. Безпека польотів***

***Секція 16. Автоматизація та енергозбереження на транспорті***

***Секція 17. Конструювання, технічне обслуговування***
***та діагностика авіаційної техніки***

***ТОМ ІІІ***

***Секція 18. Хімічна технологія, хіммотологія та інженерія***

***Секція 19. Міське, промислове, цивільне та транспортне будівництво***

***Секція 20. Технічна естетика, архітектура та дизайн***

***Секція 21. Екологічна та техногенна безпека***

***Секція 23. Економічні та управлінські бізнес-процеси розвитку авіаційних підприємств***

***Секція 24. Психологічний супровід в авіації***

***Секція 25. Авіаційна англійська мова та безпека польотів***

***Секція 26. Проблеми організаційно-правового забезпечення державного регулювання в сфері цивільної авіації***

***Секція 27. Проблеми міжнародного космічного права, пов'язані з комерціалізацією космічної діяльності***

***Секція 28. Міжнародні відносини у контексті трансформації світової безпеки: існуючі проблеми і нові виклики***

**ЗМІСТ**

***Секція 1. Вимірювання, контроль, діагностика***

*А.П. Стахова* 1.1
**ВЗАИМОСВЯЗЬ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ УЗЛОВ ТРЕНИЯ**

*С.Ф. Филоненко, Т.В. Нимченко* 1.5
**АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*С.Ф. Филоненко, А.П. Космач* 1.9
**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*В.М. Стадніченко, О.М. Трошін* 1.13
**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ НАПРАВЛЕНОГО МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ ПРИ ТЕРТІ В УМОВАХ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ ПОТОКОМ**

*В.М. Мокійчук, А.В. Переїденко* 1.17
**ПОБУДОВА СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

*В.С. Єременко, Є.Ф. Суслов, А.В. Переїденко, В.О. Роганьков* 1.21
**АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*А.М. Овсянкін, В.С. Єременко, Є.Ф. Суслов, В.А. Мотрук* 1.25
**АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Ю.В. Литвиненко, Ю.В. Погрібна* 1.29
**ПРИНЦИПИ ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ КОДУВАННЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СИГНАЛУ**

*Ю.В. Литвиненко, Ю.В. Погрібна* 1.33
**ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ НАДЛИШКОВОСТІ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ**

*Д.П. Орнатский. В.В. Довгань, Д.В. Никитенко* 1.37
**МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ**

*Д.П. Орнатский* 1.41
**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

*А.В. Дзюбаненко* 1.45
**ОБЗОР МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВИДЕОСИСТЕМ**

*А.В. Борковский* 1.49
**ВЫБОР СТРУКТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

*В.П. Квасников, Л.О. Бабич, К.С. Бабич* 1.53
**ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ ANFIS ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЯ ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ**

*В.П. Квасніков, Р.О. Задорожній* 1.57
**МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОБ'ЄКТІВ ЗОНДОВИМ МІКРОСКОПОМ**

*А.Н. Миколушко* 1.61
**ПУТИ РАЗВИТИЯ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ РЕАЛИЗАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

*О.В. Кочеткова, М.С. Руднєва* 1.65
**ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРИ РОЗРОБЦІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО РОБОТА**

*Н.М. Шибицька, Г.А. Тимофієва* 1.69
**КРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ ЗНАНЬ ЛЬОТНОГО ЕКІПАЖУ**

*А.В. Гопиенко, Т.М. Пирог* 1.73
**ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**
*Л.М. Щербак, О.О. Лещенко* 1.77
**МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ КУБІЧНИМИ СПЛАЙНАМИ**
*М.А. Тимофієва* 1.81
**СИСТЕМИ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ПРИ ВИМІРЮВАННІ**
*Ю.В. Гусєв, О.В. Дергунов, А.М. Пирог, А.А. Рижкова* 1.85
**МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ**
*Є.Я. Ваврук, І.В. Грицик* 1.89
**АЛГОРИТМ ОРГАНІЗАЦІЇ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ РЕКОНФІГУРАЦІЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ**
*В.У. Ігнаткін, В.А. Литвиненко* 1.93
**МОДЕЛІ ОЦІНКИ ВИБОРУ І ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ (ЗВТ) ТА ПРОЦЕСІВ ЇХ МЕТРОЛОГІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ**
*С.Г. Пожарский* 1.97
**МОДЕЛЬ СЕКТОРНОЙ ШКАЛЫ И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ЕЁ ШТРИХОВ**
*І.А. Орнатський, О.А. Вінічук* 1.101
**ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ДАТЧИК ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА**
*Н.А. Яремчук, М.В. Галёвская* 1.105
**СРАВНЕНИЕ ПРИБЛИЖЕННЫХ МЕТОДОВ ОБЪЕДИНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ С ОЦЕНИВАНИЕМ ТИПА А И В**
*С.В. Уваров* 1.109
**РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ**
*В.М. Гречишников, Р.К. Мирзаев* 1.113
**КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ**
*М.Б. Милешкин, И.В. Библик* 1.117
**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННЫХ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ**

***Секція 2. Інформаційна безпека***
*Б.Є. Журиленко, З.О. Самосуд* 2.1
**ПОШУК РАДІОЗАКЛАДНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗВУКУ**
*В.С. Василенко, О.В. Дубчак* 2.5
**ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ КОНТРОЛЬНОЇ ОСНОВИ ДЛЯ ЗАВАДОСТІЙКИХ КОРЕГУЮЧИХ КОДІВ**
*К.П. Ануфрієнко, А.І. Гізун, М.Ю. Коцурський* 2.9
**ОСНОВНІ КОМПЛЕКСИ КОДУ НА МОВІ С/С++, РЕЛЕВАНТНІ УРАЗЛИВОСТІ ПЕРЕПОВНЕННЯ БУФЕРУ**
*С.О. Гнатюк, В.М. Кінзерявий, Є.В. Паціра, О.Г. Корченко* 2.13
**КВАНТОВА СИСТЕМА РОЗПОДІЛУ КРИПТОГРАФІЧНИХ КЛЮЧІВ**
*В.М. Кінзерявий, С.О. Гнатюк, О.Г. Корченко, Є.В. Паціра* 2.17
**КРИПТОГРАФІЧНИЙ СПОСІБ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПОБУДОВАНИЙ НА ШИФРІ ФАЙСТЕЛЯ**

***Секція 3. Спеціалізовані комп'ютерні системи та CALS-технології***
*П.М. Павленко* 3.1
**ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ВИРОБНИЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**
*В.И. Чепиженко* 3.4
**МОДЕЛИРОВАНИЕ CALS-ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

*О.В. Заріцький* 3.8
**ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ CALS-ТЕХНОЛОГІЇ**
*І.М. Мужик* 3.12
**КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ КОРПОРАТИВНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИЩОГО НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ**
*П.І. Чередніченко, О.В. Бакалов, В.Г. Бакалов* 3.15
**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ ПЛОСКОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ**
*В.М. Рудницький, О.О. Дядюшенко* 3.19
**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ПРИЧИН ТА НАСЛІДКІВ ПОЖЕЖ**
*М.І. Васюхін, О.О. Удовенко, Н.М. Лобанчикова* 3.23
**СПЕЦІАЛІЗОВАНА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ЗАХИСТУ ТЕРИТОРІЇ АЕРОПОРТУ**
*М.И. Васюхин, С.М. Креденцар* 3.27
**МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЦЕНЫ В АЭРОНАВИГАЦИОННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ**
*П.М. Павленко, Ю.В. Задонцев, А.О. Хлевний* 3.31
**АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ В ІНФОРМАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ УНІВЕРСАЛЬНОЇ PDM-СИСТЕМИ**
*В.А. Толбатов, А.В. Толбатов* 3.35
**ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ PDM СИСТЕМ**
*М.О. Українець, Ю.О. Смирнов* 3.39
**ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ОСВІТЛЮВАЧІВ ІЗ ЗАВИСЛИМ ОСАДОМ**
*В.А. Толбатов* 3.43
**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**
*А.И. Боровик, Ю.Г. Нестеренко, Е.А. Серков* 3.46
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА**
*О.М. Чередніков, М.Є. Юрченко, О.О. Корольов, О.О. Борисов* 3.50
**АНАЛІЗ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ЗАМИКАЮЧОЇ ЛАНКИ ЗА ДЕЯКИМИ МЕТОДАМИ МОДЕЛЮВАННЯ**
*С.А. Дорошенко* 3.54
**КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО РАСШИРЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА**
*В.В. Трейтяк* 3.58
**МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЕКТНО-ВИРОБНИЧИХ ДАНИХ ПІДПРИЄМСТВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ ARIS**
*А.І. Мужик* 3.62
**ІНТЕГРАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ РЕСУРСАМИ**
*Л.А. Смирнова* 3.66
**УПРАВЛІННЯ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЕКТУВАННЯМ В ІНТЕГРОВАНОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ**
*А.В. Толбатов* 3.70
**ІНФОРМАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ГАЗОТУРБІННИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**
*В.Ю. Кудряков* 3.73
**ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ПІДПРИЄМСТВА ЗАСОБАМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**.
*П.Л. Ігнатенко, І.О. Чередніков, О.О. Борисов* 3.77
**ПРОСТОРОВА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ**

***Секція 4. Математичне моделювання та чисельні методи***

*В.П. Денисюк, А.І. Бабко, О.О. Гурнік* 4.1
**ПРО ДЕЯКІ СИСТЕМИ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ**
*В.П. Денисюк, О.П.Олійник* 4.5
**ПРО ОДИН ПІДХІД ДО ЗАДАЧІ АПРОКСИМАЦІЇ ФУНКЦІЙ НА ДИСКРЕТНІЙ МНОЖИНІ ТОЧОК**
*Л.И. Гречихин* 4.9
**СТАТИСТИЧЕСКАЯ АЭРОДИНАМИКА**
*Л.И. Гречихин, А.Б. Сивашко* 4.15
**АЭРОДИНАМИКА ЛЕТАЮЩЕГО КРЫЛА**
*В.В. Митюков* 4.24
**ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ АППРОКСИМАЦИИ СПЛАЙНАМИ ГРАФИЧЕСКИ ЗАДАННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ**
*О.В. Карупу* 4.27
**ОЦІНКИ ДЛЯ МОДУЛІВ ГЛАДКОСТІ ФУНКЦІЙ, ЩО ЗДІЙСНЮЮТЬ КОНФОРМНІ ВІДОБРАЖЕННЯ ОДНОЗВ'ЯЗНИХ ОБЛАСТЕЙ**
*В.Г. Демидко* 4.31
**ІНФОРМАТИВНІСТЬ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ**
*Л.В. Рибачук* 4.35
**ПРО ДРОБОВЕ ІНТЕГРО-ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ТРИГОНОМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ**
*О.Д. Глухов* 4.39
**ЛЕМА ПРО ДОМІНАТОРИ В ДВОДОЛЬНИХ ГРАФАХ ТА ДЕЯКІ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ**
*Г.В. Сандраков, С.Б. Бойко* 4.42
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ**
*Г.М. Терещук* 4.46
**ПРО ПОБУДОВУ НАБЛИЖЕНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ЗВИЧАЙНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ДРУГОГО ПОРЯДКУ У ВИГЛЯДІ ТРИГОНОМЕТРИЧНИХ СПЛАЙНІВ**
*О.Б. Пасічник* 4.50
**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ВПЛИВУ СЕРЕДНЬОРІЧНОЇ КІЛЬКОСТІ ОПАДІВ НА АРЕАЛИ ЛІСІВ УКРАЇНИ**
*О.Б. Яремчишин, Р.А. Бунь* 4.54
**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ВІД ВИРОБНИЦТВА М'ЯСА НА РЕГІОНАЛЬНОМУ РІВНІ**
*Є.О. Шквар* 4.58
**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ТУРБУЛЕНТНИМИ ПРИМЕЖОВИМИ ШАРАМИ ШЛЯХОМ РУЙНУВАННЯ ВЕЛИКОМАСШТАБНОЇ ТУРБУЛЕНТНОСТІ**
*А.В. Касьянов, В.В. Пахненко* 4.63
**ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПЕРЕВАГ ПРИНЦИПУ МАКСИМУМУ СУБ'ЄКТИВНОЇ ЕНТРОПІЇ**
*Т.В. Козлова* 4.67
**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТІКАННЯ ДОЩОВИХ ОПАДІВ ЗІ ЗЛІТНО-ПОСАДОЧНОЇ СМУГИ**
*П.П. Барышовец* 4.71
**О БЕСКОНЕЧНЫХ ГРУППАХ С ДОПОЛНЯЕМЫМИ НЕАБЕЛЕВЫМИ ПОДГРУППАМИ**
*Н.Р. Кондратенко, Т.В. Черняхович* 4.75
**ДО ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**
*В.К. Репета* 4.79
**ПРО ТРИГОНОМЕТРИЧНІ ТОТОЖНОСТІ ТА РЕКУРЕНТНІ СПІВВІДНОШЕННЯ**

*Н.В. Зосимович, В.Б. Ревенко* 4.86
**МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОПЕРАТОРА БЕСПИЛОТНОГО ЛА**
*О.Ю. Давыдов, к.т.н., В.Г. Егоров, д.т.н., В.Ю. Зубарев, А.И. Кочегаров* 4.91
**МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

***Секція 5. Комп'ютерні технології***

*Д.В. Айдаркин, С.Г. Косачевский* 5.1
**РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ СРЕДСТВ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЛЕТНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА**
*В.К. Антонов* 5.5
**МЕТОДЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ И АДАПТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛОВ С КРАТНЫМИ ИНТЕГРАЛАМИ**
*В.М. Боровик* 5.10
**АНАЛІЗ СИСТЕМ КЛІЄНТ-СЕРВЕР ЯК СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ (СМО)**
*В.П. Гамаюн, В.В. Стариков* 5.14
**МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ АЛГОРИТМОВ В МАКРООПЕРАТОРНУЮ ФОРМУ**
*В.П. Гамаюн* 5.18
**КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ БОЛЬШОГО ДИАПАЗОНА**
*О.М. Глазок* 5.22
**МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМ ЛІНІЙНИХ АЛГЕБРАЇЧНИХ РІВНЯНЬ ЗА ДРУГИМ МЕТОДОМ ЛЯПУНОВА**
*Н.М. Глазунов* 5.26
**ТЕОРЕТИКО-КАТЕГОРНЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОНТОЛОГИЙ ФОРМАЛЬНОЙ ТЕОРИИ**
*И.Н. Давиденко, К.Ю. Бабий* 5.30
**СПОСОБ МОНИТОРИНГА КРУПНО МАСШТАБИРУЕМЫХ GRID-СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛА SNMP**
*А.С. Дуднік, О.М. Березовський* 5.34
**ЗАСОБИ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ БЕЗДРОТОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ЧЕРГАМИ**
*О.В. Іванкевич* 5.38
**ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ БУФЕРИЗАЦІЇ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ БАЗАМИ ДАНИХ ВЕЛИКИХ РОЗМІРІВ**
*С.Г. Косачевский* 5.42
**ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНТРОЛЬНО-КОРРЕКЦИОННОЙ ФУНКЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПОДГОТОВКИ ЛЕТНОГО СОСТАВА**
*Г.М. Кременецький* 5.46
**ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЗМІВ WEB-СЕРВІСІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ДИНАМІЧНО КЛАСТЕРИЗУЄМИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ**
*Ю.О. Кулаков, І.А. Клименко* 5.50
**ОСОБЛИВОСТІ ПЛАНУВАННЯ В МОБІЛЬНИХ GRID**
*А.Ю. Кулаков* 5.54
**СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ В GRID-СИСТЕМАХ**
*А.Е. Литвиненко* 5.58
**АНАЛИЗ ПОДМНОЖЕСТВ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КОМБИНАТОРНЫХ ЗАДАЧ**
*М.Г. Луцький, В.А. Хоменко, Є.М. Сидоров* 5.62
**ЗАСОБИ ЗВОРОТНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВІАЦІЙНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-МОДЕЛЮЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ**
*О.П. Мартынова, В.Л. Баранов* 5.66
**МЕТОДЫ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ И МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ**
*Ю.М. Мінаєв, М.М. Гузій* 5.72
**ВИЗНАЧЕННЯ АНОМАЛЬНИХ СТАНІВ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ НА ПІДСТАВІ СТРУКТУРИЗАЦІЇ ТРАФІКА ТЕНЗОРАМИ ПАРНИХ РАНГІВ**

*В.В. Митюков, Н.У. Ушаков* 5.76
**ВИЗУАЛЬНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ВС ПО АРХИВНЫМ ЗАПИСЯМ, ПОЛУЧЕННЫМ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ ТРЕНАЖЕРА САМОЛЕТА ЯК-18Т 36 СЕРИИ**
*О.С. Муранов* 5.80
**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ СИСТЕМНИХ ПОМИЛОК АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ КОМУТАТОРОМ**
*О.С. Муранов* 5.85
**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЗМУ ЗГЛАДЖУВАННЯ ПАКЕТНОГО ТРАФІКА ТИПУ „ВІДРО ТОКЕНІВ”**
*В.І. Надточій* 5.89
**OPNET ЯК ЗАСІБ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ**
*Л.С. Онокой* 5.93
**ЭЛЕКТРОННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ И РЕШЕНИЯ**
*М.В. Потапов* 5.97
**АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ МАТРИЦЫ ТРАФИКА СОВРЕМЕННОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СЕТИ**
*П.О. Приставка, О.Г. Чолишкіна* 5.101
**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБРОБКИ ЦИФРОВАНИХ ЗОБРАЖЕНЬ «GREEN GERBERA»**
*Е.В. Толстикова* 5.105
**АСИМПТОТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И ЭФФЕКТИВНОСТИ МАРШРУТИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**
*Н.Н. Халаменда* 5.109
**РАСПОЗНАВАНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ РЕЧИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**
*А.Є. Ялковський* 5.113
**МЕТОДИ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВИ ЛЮДИНИ**

***Секція 6. Аеронавігація***

*Н.А. Михалочкин, Касем Аббуд Махди* 6.1
**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**
*Т.Ф. Шмельова, Ю.В. Сікірда, І.Л. Якуніна* 6.7
**ДЕКОМПОЗИЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПРОЦЕСІВ ДІЯЛЬНОСТІ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА В НЕОЧІКУВАНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНОГО СУДНА**
*Н.А. Михалочкин, Р.В. Газдюк, Касем Аббуд Махди* 6.11
**ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ РЕЖИМ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ ЗАВИСИМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ В СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ**
*І.Л. Якуніна, Т.Ф. Шмельова* 6.16
**МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ АВАРІЙНОЇ СИТУАЦІЇ У ВИПАДКУ ЗІТКНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СУДНА З ПТАХОМ, НА ЕТАПІ ЗЛЬОТУ**
*О.С. Слюняєв* 6.20
**ЗАГАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ АЕРОНАВІГАЦІЇ**
*В.П. Харченко, О.М. Алєксєєв* 6.25
**ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ УПРАВЛІННІ БЕЗПЕКОЮ ПОЛЬОТІВ**
*С.І. Ільницька* 6.29
**АНАЛІЗ СХЕМ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНИХ ІНЕРЦІАЛЬНО-СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ**
*Ю.А. Авер‘янова, А.А. Аверьянов* 6.37
**МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ПОЛЯРИМЕТРІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ДЛЯ АВІАЦІЇ АТМОСФЕРНИХ ЯВИЩ**
*В.П. Харченко, Ю.В. Чинченко* 6.41
**ЕТАПИ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БЕЗПЕКОЮ ПОЛЬОТІВ**

*І.В. Остроумов* 6.45
**ОСНОВНІ ПЕРЕВАГИ ЗАСТОСУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ «МОБІЛЬНЕ НЕБО» ДЛЯ УКРАЇНИ**
*Е.Е. Нечаев* 6.48
**НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

***Секція 7. Аерокосмічні системи моніторингу та управління***

*Е.О. Ковалевський* 7.1
**ОЦІНКА ШВИДКОДІЇ АДАПТИВНИХ АНТЕННО-ПРИЙМАЛЬНИХ СИСТЕМ**
*Э.А. Ковалевский* 7.5
**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СПУТНИКАХ ДЛЯ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ**
*О.В. Куценко* 7.9
**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІКУ ДИФЕРЕНЦІЙНОЇ ПОПРАВКИ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ**
*К.О. Миронов* 7.13
**ЗАЛЕЖНІСТЬ ГЕОМЕТРИЧНОГО ФАКТОРУ ВІД КОМБІНАЦІЙ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКІВ У СУЗІР'ЯХ GPS ТА ГЛОНАСС**
*В.П. Харченко, І.В. Васильєв* 7.17
**МЕТОДИ БОРОТЬБИ З ЗАВАДАМИ В СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**
*В.В. Конін, О.С. Савчук* 7.21
**МОДЕЛЬ СИГНАЛУ СИСТЕМИ GALILEO З НОВИМ ТИПОМ МОДУЛЯЦІЇ BOC**
*О.С. Погурельський, В.В. Конін* 7.25
**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ ВИЗНАЧЕНЬ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СИСТЕМ GPS ТА ГЛОНАСС**
*П.Н. Мележик, С.Д. Андренко, Ю.Б. Сидоренко, С.А. Провалов, В.Б. Разсказовский, Н.Г. Резниченко, В.А. Зуйков, М.Г. Балан, А.В. Варавин, М.В. Колисниченко, Ю.Н. Муськин* 7.29
**РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ СЕНСОР ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ НАЗЕМНОГО ДВИЖЕНИЯ В АЭРОПОРТАХ**
*В.П. Медведев, Л.А. Конина, В.В. Конин* 7.33
**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ**
*В.Г. Мелкумян, І.А. Приходько* 7.37
**МОНІТОРИНГ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ**
*В.В. Загоруйко, Т.Л. Малютенко* 7.41
**КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНО-КОРЕГУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ**
*В.Г. Мелкумян, В.М. Кондратюк* 7.45
**ОЦІНКА ЯКОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ КОРИГУВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ**
*О.В. Ізвалов, О.І. Москаленко, В.М. Неділько* 7.49
**АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ СКЛАДНОСТІ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ**
*С.Н. Коренной* 7.53
**УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ОТ СТАНДАРТНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМУЮ ВЫСОТУ ПОЛЕТА ВОЗДУШНОГО СУДНА**
*М.Ю. Сорока* 7.57
**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ТРЕНАЖЁРНОЙ ПОДГОТОВКИ АВИАДИСПЕТЧЕРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ НА ТРЕНАЖЁРЕ УВД**

УДК.621.891:621.316

*А.П. Стахова, м.н.с.*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# ВЗАИМОСВЯЗЬ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫМ СОСТОЯНИЕМ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

*В работе приводятся закономерности взаимосвязи сигналов акустической эмиссии процессами деформирования и разрушения узлов трения. Проведены экспериментальные исследования сигналов АЭ, которые показали хорошее согласование с результатами теоретических исследований.*

**Введение.** При диагностике узлов трения используется широкая гамма методов, позволяющих измерять большое число параметров. Однако одним из наиболее перспективных методов для проведения исследований и диагностики состояния узлов трения является метод акустической эмиссии (АЭ). Он обладает высокой чувствительностью к процессам, происходящим в поверхностных слоях материалов, и позволяет определять основные закономерности изменения акустического излучения, сопровождающего износ узлов трения. Работы в данном направлении касаются как теоретических так и экспериментальных исследований.

В работе [1] была разработана модель результирующего сигнала АЭ, который формируется при изнашивании поверхностных слоев материалов. В её основе лежат модели сигналов АЭ, которые возникают при разрушении вторичных структур I и II типов в некоторой области контактного взаимодействия материалов пары трения.

Моделирование результирующих сигналов АЭ на стадии нормального изнашивания, проведенное в [2], показало, что с увеличением напряженно-деформированного состояния происходит возрастание как амплитуды результирующего сигнала АЭ, так и её разброса амплитуды. При преобладающем механизме изнашивания определено [3], что основной вклад в амплитуду результирующего сигнала АЭ вносят сигналы, формируемые при разрушении вторичных структур II типа. При этом нижний уровень результирующего сигнала АЭ определяется сигналами, возникающими при разрушении вторичных структур I типа. Увеличение напряженно-деформированного состояния, а также скорости вращения элементов узла трения приводит к изменению временных условий перекрытия сигналов АЭ при разрушении вторичных структур I и II типа, которые вносят различный вклад в амплитуду результирующего сигнала АЭ. Однако в общем случае происходит возрастание амплитуды результирующего сигнала АЭ и величины её разброса.

**Результаты исследований.** Анализ параметров модельных результирующих сигналов АЭ показал, что возрастание напряженно-деформированного состояния поверхностей пар трения приводит к возрастанию среднего уровня их амплитуды. Теоретическая зависимость изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ от величины контактных напряжений (контактной нагрузки) показана на рис.1. График на рис.1 представлен в относительных единицах в виде изменения $\widetilde{\overline{U}} = \overline{U}_T / \overline{U}_m$, $\widetilde{\sigma} = \sigma_T / \sigma_m$, где $\overline{U}_T, \overline{U}_m$ - соответственно, текущий средний уровень амплитуды результирующего сигнала АЭ и его максимальное значение; $\sigma_T$, $\sigma_m$ - соответственно, текущее значение контактных напряжений и его максимальное значение. С учетом постоянства площадки контактного взаимодействия узла трения можно перейти от контактных напряжений к контактным нагрузкам $\widetilde{P}$, которые определяются следующим образом

$$\widetilde{P} = S \cdot \widetilde{\sigma},$$

где $S$ - площадь контактного взаимодействия.

Из (рис.1) видно, что зависимость изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ от контактных напряжений носит линейный характер. Обработка зависимости с использованием графических методов анализа данных показала, что она хорошо описывается выражением вида

$$\tilde{\tilde{U}} = C + D\,\tilde{\sigma}, \qquad (1)$$

где $C$ и $D$ – коэффициенты аппроксимирующего выражения (для данных приведенных на рис.1, их значения, соответственно, равны – $C$ =-0,81, $D$ =1,8); $\tilde{\sigma}$ - контактные напряжения в относительных единицах.

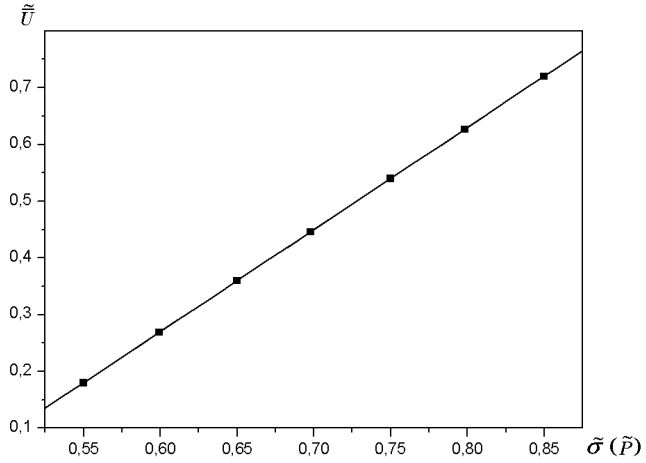



Рис. 1. Зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ от величины контактных напряжений в относительных единицах

Проверка полученного теоретического результата в виде зависимости (1) осуществлялась при обработке результирующих сигналов АЭ и контактных напряжений, регистрируемых в процессе экспериментальных исследований пар трения. Исследования проводили на этапе нормального изнашивания.

Для регистрации контактных напряжений использовали тензодатчик. Сигналы с его выхода усиливались и поступали в персональный компьютер (ПК). ПК обрабатывал электрический сигнал с определением величины контактного напряжения. Результаты представлялись в цифровом виде и в виде графической зависимости изменения контактных напряжений во времени.

Одновременно с обработкой контактных напряжений осуществлялась обработка результирующего сигнала АЭ. Его регистрация проводилась с использованием пьезокерамического датчика, который был установлен на неподвижном образце пары трения. После усиления в предварительном усилителе сигнал АЭ поступал в мобильный компьютер (МК), где осуществлялась его обработка с использованием программного математического обеспечения. Результаты обработки также представлялись в цифровом виде и в виде графических зависимостей изменения амплитуды результирующего сигнала АЭ во времени. На рис.2 приведены зависимости изменения среднего уровня амплитуд сигналов АЭ и сигналов с выхода тензодатчика от величины контактных напряжений.

Обработка полученных зависимостей с использованием графических методов анализа данных показала, что экспериментальная зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ от контактных напряжений (1, рис.2) хорошо описывается выражением вида

$$\overline{U}_A = C_1 + D_1 \sigma_К \qquad (2)$$

где $C_1$ и $D_1$ – коэффициенты, значения которых, для данных приведенных на рис.2, кривая 1, соответственно, равны $C_1$ =10,71, $D_1$ =0,046; $\tilde{\sigma}$ - контактные напряжения. При этом стандартное отклонение для вероятности $p$=0,9997 составляет $s_1^2$ =0,1554.

Обработка сигнала с выхода тензодатчика в виде зависимости изменения его амплитуды от контактных напряжений приведена на рис.2, кривая 2. Зависимость 2, рис.2 подобна зависимости, полученной для средней амплитуды результирующего сигнала АЭ (кривая 1, рис.2). Она так же описывается линейной функцией вида

$$\overline{U}_{TA} = C_2 + D_2 \sigma_К$$

где $C_2$ и $D_2$ – коэффициенты, значения которых, соответственно, равны $C_2$ =-2,453, $D_2$ =0,00819; $\sigma_К$ - контактное напряжение. При этом среднеквадратическое отклонение для вероятности $p$=0,9815 равно $s_2^2$ =0,5153.

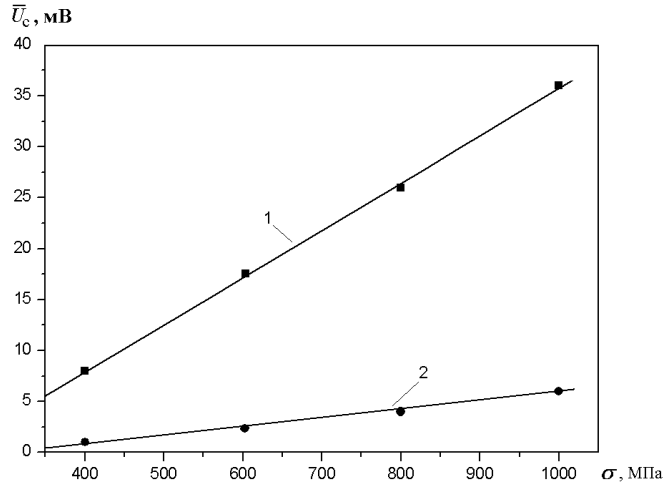


Рис. 2. Зависимость изменения средней амплитуды результирующего сигнала АЭ 1 и сигнала на выходе тензодатчика 2 от величины контактных напряжений

Из полученных результатов видно, что чувствительность изменения электрического сигнала на выходе тензодатчика к контактным напряжениям и его разрешающая способность в 6 раз меньше, чем чувствительность изменения среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ.

Из зависимости (2) можно получить обратную зависимость, которая описывает контактные напряжения от величины среднего уровня амплитуды результирующего сигнала АЭ. Обратная зависимость, также описывается линейной функцией вида

$$\sigma_{\text{К}} = C_{\text{А}} + D_{\text{А}} \overline{U}_A , \qquad (3)$$

где $C_{\text{А}}$ и $D_{\text{А}}$ – коэффициенты, значения которых, соответственно, равны $C_{\text{А}}$ = 236,35, $D_{\text{А}}$ =21,61.

При этом среднеквадратическое отклонение для вероятности $p$=0,9987 составляет $s_3^2$ =24,94.

Обратная зависимость, описывающая контактные напряжения по результатам измерения амплитуды сигнала на выходе тензодатчика, аналогична зависимости (3)

$$\sigma_{\text{К}} = C_3 + D_3 \overline{U}_{TA} , \qquad (4)$$

где $C_3$ и $D_3$ – коэффициенты, значения которых, соответственно, равны $C_3$ = 314,19 и $D_3$ =117,62.

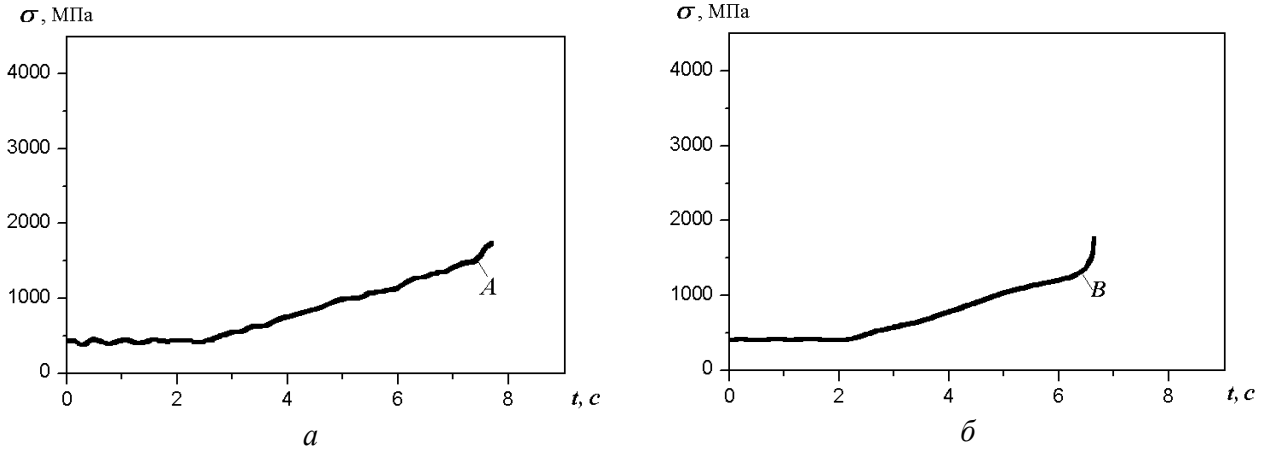
При этом среднеквадратическое отклонение для вероятности $p$=0,9815 составляет $s_4^2$ =62,55.

Наличие зависимости (3) позволяет определять контактные напряжения при работе пары трения, как в лабораторных так и производственных условиях. Это представляется важным и при решении задачи определения момента перехода узла трения со стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания, что обусловлено высокой чувствительностью метода АЭ.

Для определения контактного напряжения в момент возникновения заедания были проведены экспериментальные исследования, которые заключались в том что, после завершения приработки реализовывали режим с непрерывным увеличением нагрузки на пару трения. При этом проводилась регистрация и обработка сигналов АЭ и электрических сигналов с выхода тензодатчика. Результаты исследований в виде зависимостей изменения контактных напряжений во времени показаны на рис.3 *а, б*, соответственно, при обработке средней амплитуды сигналов АЭ и сигналов с выхода тензодатчика. Точки *А* и *В* (рис.3, *а, б*) - соответствуют моментам времени возникновения заедания.

Из рис.3, *а* видно, что зависимость изменения контактных напряжений во времени при обработке сигналов с выхода тензодатчика носит изрезанный характер. Зависимость, полученная при обработке результирующего сигнала АЭ, имеет гладкий характер своего изменения (рис.3, *б*). Начальные участки зависимостей, в пределах времени порядка 2 мин испытаний, характеризуются практически постоянством величин обрабатываемых сигналов, что соответствуют стадии нормального износа. При линейном увеличении внешней нагрузки наблюдается линейное возрастание зависимостей изменения контактных напряжений. В момент времени возникновения заедания на зависимостях фиксируется отклонение от линейного характера их изменения. Однако по данным обработки сигнала АЭ наблюдается скачкообразное возрастание контактных напряжений (рис.3, *б*), а по сигналам с выхода

тензодатчика контактные напряжения изменяются плавно(рис.3, *а*). При этом начало перехода узла трения со стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания




*а* *б*

Рис. 3 Зависимости изменения контактных напряжений во времени, полученные при обработке сигналов на выходе тензодатчика (*а*) и при обработке средней амплитуды результирующего сигнала АЭ (*б*)

фиксируется в разные моменты времени. По результирующему сигналу АЭ (точка *А*, рис.3, *б*) фиксируется через 6,4 мин, а по сигналам с тензодатчика (точка *В*, рис.3, *а*) через 7,5 мин после начала их обработки. По результирующему сигналу АЭ момент времени начала возникновения заедания фиксируется на 1,1 мин раньше, чем по сигналам с выхода тензодатчика. При этом по АЭ контактное напряжение составляет 1410 МПа (точка *А*, рис.3, *б*), а его значение по сигналам с выхода тензодатчика равно 1560 МПа (точка *В* рис.3, *а*).

Исходя из полученных данных время начала перехода узла трения со стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания при обработке результирующего сигнала АЭ определяется на 15% раньше, чем при обработке сигналов с выхода тензодатчика. При этом значение контактного напряжения, определяемое по сигналам АЭ, на 10% меньше, чем по сигналам, полученным с использованием тензодатчика.

## Выводы

Полученные результаты показали, что зависимости изменения среднего уровня результирующего сигнала АЭ и сигнала с выхода тензодатчика от контактных напряжений носит линейный характер. Однако, чувствительность фиксации момента времени начала перехода узла трения со стадии нормального к стадии катастрофического изнашивания по среднему уровню результирующего сигналу АЭ в 6 раз больше, чем чувствительность по сигналам с выхода тензодатчика. Результаты проведенных исследований показали, что обработка среднего уровня результирующего сигнала АЭ позволяет определять контактные напряжения в любой момент времени, включая и момент времени начала возникновения заедания. Полученный результат важен с точки зрения выбора материалов узлов трения, оптимизации режимов их работы, выбора смазочных материалов, а так же при проведении их диагностики в условиях эксплуатации. Кроме того, фиксация момента начала возникновения заедания позволяет своевременно вывести узел трения из работы и предотвратить его разрушение.

## Список литературы

1. *Бабак В.П.* Моделі сигналів акустичної емісії при руйнуванні поверхневих шарів пар тертя / *В.П. Бабак, С.Ф. Філоненко, В.М. Стадниченко, А.П. Стахова* // Проблеми тертя та зношування. – 2007. – Вип.47. – С. 3–8.

2. *Babak V.P.* The acoustic emission signals modelling at friction of materials' surface layers / *V.P. Babak, S.F. Filonenko, V.M. Stadnychenko, A.P. Stahova* // Wear (London, UK).- in printing.

3. *Filonenko S.F.* Modeling of the acoustic emission signals for the case of material's surface layers distraction in the process of friction / *S.F. Filonenko, A.P. Stakhova, T.N. Kositskaya* // Вісник НАУ. – 2008. – №2. – С.28–24.

УДК 620.179:534.6

*С.Ф. Филоненко, д.т.н, Т.В. Нимченко, ассистент*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Рассмотрена модель формирования сигналов акустической эмиссии при разрушении композиционных материалов. Приведены результаты исследований акусто-эмиссионных сигналов при разрушении композита.*

**Введение.** Композиционные материалы состоят из двух или более компонент (основы и наполнителя), в качестве которых для наполнителя используются – металлические нити, монокристаллические “усы”, многокомпонентные волокна, ткани, а так же дисперсные частицы карбидов, боридов, оксидов, алмазов, кубического нитрида бора, а для матрицы – различные металлы, пластмассы, керамики. Композиционные материалы нашли широкое применение от армированного бетона, содержащего стальные ячейки, ребра, пенопласт до легких усиленных волокнами аэрокосмических структур [1-3].

Разрушение композиционного материала, находящегося под нагрузкой, является сложным процессом. Характер его развития определяется свойствами компонент, состоянием границ раздела, структурой армирующих материалов и другими факторами.

Поскольку акустическая эмиссия (АЭ) является отражением протекания процесса разрушения, то ее применение является весьма перспективным при изучении разрушения композиционных материалов. В первую очередь это относится к представлению разрушения композиционных материалов в виде пучка волокон [4].

**Модель сигнала АЭ**

В работах [5-8] рассмотрена модель разрушения композиционных материалов, представленных в виде пучка волокон. В соответствии с данной моделью в [9] разработана модель сигнала АЭ. Она основана на следующих допущениях. Образец композиционного материала состоит из числа $N_0$ волокон или элементов. При прикладывании к такому образцу напряжения каждый элемент деформируется упруго, вплоть до его разрушения. Все элементы обладают одинаковой прочностью. Разрушение первого элемента происходит за счет существования термофлуктуационных процессов, являющихся спусковым механизмом, ведущим к развитию процесса разрушения, вплоть до полного разделения образца.

Согласно [6, 7] скорость изменения оставшихся элементов (волокон) при развитии процесса разрушения, с учетом отмеченных условий, описывается уравнением

$$\frac{d}{dt}[N_0 - N_f(t)] = -\upsilon(\sigma)[N_0 - N_f(t)], \qquad (1)$$

где $N_0$ – исходное (начальное) количество элементов; $N_f(t)$ – число разрушившихся элементов, зависит от времени; $[N_0 - N_f(t)]$ – число оставшихся элементов; $\upsilon(\sigma)$ – скорость развития процесса разрушения, которая зависит от величины приложенного напряжения $\sigma(t)$.

Процесс разрушения элементов композиционного материала при приложении к нему нагрузки, по сути, является кинетическим процессом. Тогда, согласно кинетической теории прочности [9] состояние каждого элемента характеризуется временем до разрушения. С учетом уравнения С.Н. Журкова [10] получено выражение для количества неразрушенных элементов композиционного материала

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi}(e^{-\chi(t_0 - t)} - e^{\chi t_0})}, \quad (2)$$

где $\tau_0$ – параметр, совпадающий по величине с периодом тепловых колебаний атомов решетке твердого тела; $U_0$ – начальная энергия активации (величина начального энергетического барьера) процесса разрушения; $k$ – постоянная Больцмана; $T$ – температура; $\gamma$ – структурно чувствительный коэффициент (характеристика чувствительности материала к напряжению); $\alpha$ – скорость изменения приложенной нагрузки; $\chi = \frac{\gamma\alpha}{kT}$; $t_0 = \frac{U_0}{\gamma\alpha}$.

Предполагая, что разрушение каждого элемента сопровождается генерированием одиночного импульса АЭ, который распространяется по материалу без затухания, его длительность $\delta$ мала и намного меньше процесса разрушения образца, а нагрузка изменяется по закону $\sigma(t) = \alpha t$, выражение для результирующего сигнала АЭ $U(t)$ будет иметь следующий вид

$$U(t) = u_0 \alpha t e^{-\chi(t_0 - t)} e^{-\frac{1}{\tau_0 \chi}(e^{-\chi(t_0 - t)} - e^{\chi t_0})}, \quad (3)$$

где $u_0 = \frac{N_0}{\tau_0}\delta_s$ – максимально возможное смещение при мгновенном разрушении композиционного материала.

Отметим, что выражение (3) получено с учетом того, что развитие процесса разрушения рассматривается не как процесс механического разрушения, а как процесс, который протекает по термоактивационному механизму.

**Моделирование сигналов АЭ**

В соответствии с выражениями (2) и (3) проведено моделирование изменения количества оставшихся элементов во времени и сигналов АЭ при развитии процесса разрушения композиционного материала.

Расчеты зависимостей изменения во времени количества элементов, остающихся в процессе развития разрушения, в виде графиков $\tilde{N}(t) = N(t)/N_o$, представленных в нормированных единицах, приведены на рис. 1. При проведении расчетов параметры, входящие в выражение (2), были приведены к безразмерным величинам, а время нормировано на $t_0$. Соотношение величин $\chi$ и $1/\chi\tau_0$ выбирались исходя из того, что период собственных колебаний атомов твердого тела значительно меньше времени развития процесса разрушения (времени ввода нагрузки), т.е. $(1/\chi\tau_0) >> \chi$. Изменение величины $1/\tau_0$ характеризует изменение свойств материала. Увеличение значения $\chi$ характеризует увеличение уровня нагрузки (напряжения), приложенной к материалу.

Результаты расчетов зависимости изменения во времени амплитуды сигналов АЭ, формируемых в процессе развития разрушения элементов, согласно (3), в виде графиков $\tilde{U}(t) = U(t)/U_o$, представленных в нормированных единицах амплитудных значений, приведены на рис. 2. При проведении расчетов параметры, входящие в выражение (3), приведены к безразмерным величинам, а время нормировано на $t_0$.

Из рис. 1 видно, что кривые изменения во времени оставшихся (не разрушившихся) элементов носят непрерывный спадающий характер с отсутствием скачка (критического времени с особенностями в производных). С возрастанием напряжения, приложенного к материалу (возрастание величины параметра $\chi$), происходит увеличение крутизны падения кривых изменения оставшихся элементов и их сдвигу по оси времени в сторону больших значений.

В тоже время, детальный анализ зависимостей изменения оставшихся элементов, приведенных на рис. 1, показывает, что на зависимостях имеется точка перегиба, которая хорошо наблюдается при увеличении разрешения по временному масштабу.

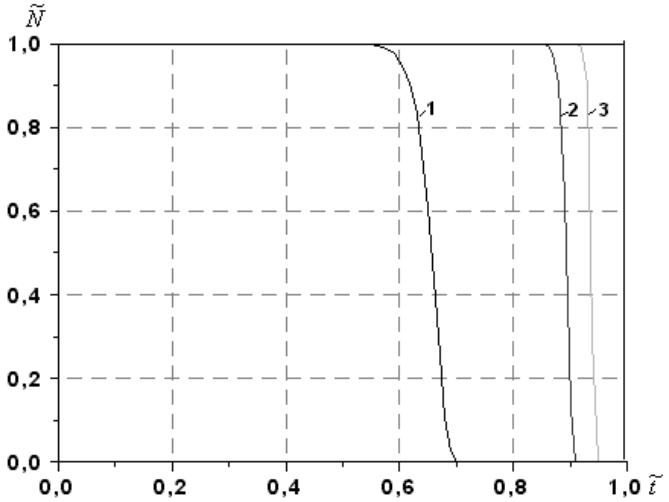



Рис. 1. Изменение количества остающихся элементов во времени, согласно (11), при развитии процесса разрушения. Значения параметра $\chi$ для кривых равны: 1 – 50; 2 –150; 3 – 250. Значения параметра $1/\chi\tau_0$ равны: 1- 20000000; 2– 6666666; 3 – 4000000.

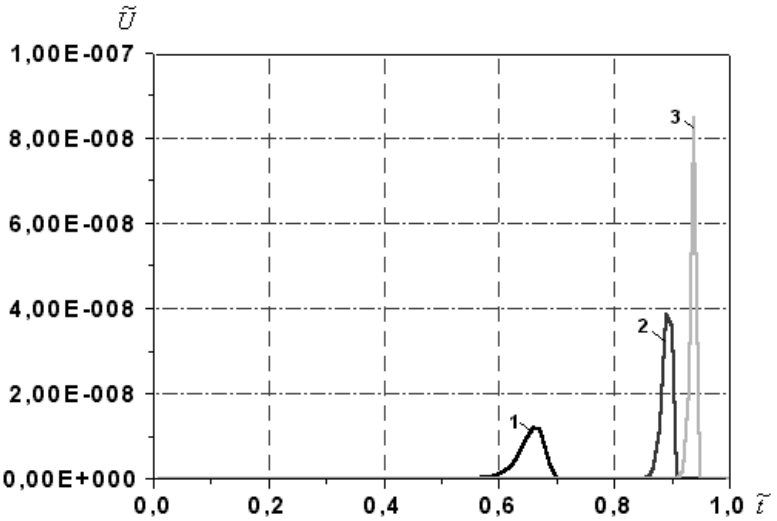



Рис. 2. Сигналы АЭ формируемые при развитии процесса разрушения элементов композиционного материала во времени. Значения параметра $\chi$ для кривых равны: 1 – 50; 2 –150; 3 – 250. Значения параметра $1/\chi\tau_0$ равны: 1- 20000000; 2– 6666666; 3 – 4000000.

Непрерывность процесса разрушения элементов сопровождается формированием непрерывного сигнала АЭ с акселерационным нарастанием переднего фронта (рис. 2). При этом максимум сигнал АЭ отвечает моменту времени наиболее быстрого разрушения, что соответствует точке перегиба на зависимостях изменения числа оставшихся элементов во времени.

При увеличении значения напряжения, приложенного к материалу (возрастание величины параметра $\chi$), происходит возрастание амплитуды сигнала АЭ, его сдвиг по оси времени и уменьшение длительности, т.е. сжатие сигнала во времени с трансформацией его формы.

При изменении физико-механических характеристик материала (изменение параметра $1/\chi\tau_0$) закономерности изменения параметров и трансформация формы сигнала АЭ сохраняются.

## Вывод

Разработана модель сигнала АЭ, которая основывается на существующих представлениях разрушения композиционного материала в виде пучка волокон. При построении модели использован кинетический подход или кинетическая закономерность термоактивационного процесса разрушения, которая описывается формулой Журкова. Разработанная модель показала, что в сигналах акустической эмиссии отсутствуют скачки или критическое время развития процесса с особенностями в производных, которые характерны для моделей механического разрушения.

При этом кривые изменения во времени неразрушившихся элементов носят непрерывный спадающий характер. С возрастанием напряжения приложенного к композиционному материалу, происходит увеличение крутизны падения кривых изменения оставшихся элементов и их сдвиг по оси времени в сторону больших значений. Непрерывный процесс разрушения сопровождается формированием непрерывного сигнала АЭ с акселерационным нарастанием переднего фронта и максимальной амплитудой в момент времени наиболее быстрого развития процесса разрушения. При увеличении приложенного напряжения происходит возрастание амплитуды сигнала АЭ, его сжатие и сдвиг по оси времени. Постепенное возрастание напряжения приводит к трансформации формы АЭ сигнала с исчезновением акселерационного роста его амплитуды, что, вероятно, обусловлено перераспределением влияния термоактивационного и механического механизмов развития процесса разрушения.

## Список литературы


1. *R.D. Adams and P. Cawley* A review of defect types and nondestructive testing techniques for composites and bonded joints // NDT International Volume 21. – 1988. - №4. – P.208-221.

2. Композиционные материалы / Под ред. *Л. Браутмана,* З. Крока.-М.: Мир, 1978. - 478 с.

3. *Фудзии Т., Дзако М.* Механика разрушения композиционных материалов. - М.: Мир, 1982. - 232с.

4. *Lyakhovsky V., Ben-Zion Y., Agnon A.* Distributed damage, faulting and friction// J. Geohhys.-1997.-v.102.-No 27.-P.635 - 649.

5. *Lyakhovsky V., Podladchikov Y., Polikov A.* A rheologocal model of a fractured solid //Tectonophysics.-1993.-v.226.-P.187 - 198.

6. *Shcherbakov R.* On modeling of geophysical problems/ A dissertation for degree of doctor of philosophy (Cornell university).-2002.-209 P.

7. *Turcotte D.L., Newman W.I., Shcherbakov R.* Micro and macroscopic models of rock fracture // Geophes. J. Intern.-2003.-v.152.-No 3.-P.718 - 728.

8. *Guarino A., Garcimartin A., Ciliberto S.* An experimental test of the critical behavior of fracture precursors // Europ. Phys. J.-1998.-B6.-P.13-24.

9. *Филоненко С.Ф., Калита В.М., Нимченко Т.В.* Модель формирования сигналов акустической эмиссии при разрушении композиционных материалов // Технологические системы. – 2009. - №2 (в печати).

10. *Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел.-М.: Наука, 1974. - 560 с.

УДК: 621.891:621.316

*С.Ф. Филоненко, д.т.н., А.П. Космач, аспирант*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В статье приведены результаты моделирования сигналов акустической эмиссии при разрушении композиционных материалов. Рассмотрены случаи возможных разрушений композиционных материалов, а также проанализирован характер основных зависимостей.*

## Введение

Одной из моделей разрушения композиционных материалов является модель, которая основана на представлении материала в виде пучка волокон (Smith и Phoenix [1]; Curtin [2]; Newman и Phoenix [3]). Разрушение элементов такого материала сопровождается излучением акусто-эмиссионных (АЭ) событий, т.е. разрушение каждого элемента рассматривается как образование микротрещин [4], являющихся источниками излучения АЭ [5].

Статистика отказов отдельных волокон может быть либо статической либо динамической. С точки зрения статики, вероятность отказа волокна определяется в рамках действующего на него напряжения. При этом разрушение рассматривают как происходящее мгновенно. С точки зрения динамики отказов, рассматривают вероятность возникновения разрушения волокон при напряжениях, которые меньше их прочности (Coleman [6, 7]). При этом зависимость изменения количества разрушившихся волокон $N_f$ описывается выражением вида [8]

$$N_f(t) = N_0\left\{1-\left[1-\left(\frac{t}{t_f}\right)^{\rho+1}\right]\right\}^{\frac{1}{\rho}}, \qquad (1)$$

где $N_0$ – начальное количество элементов; $t$, $t_f$ – соответственно, текущее значение времени и время разрушения образца; $\rho$ – постоянная, которую определяют из экспериментов.

Предполагается, что энергия АЭ $e_a$ пропорциональна части высвобождаемой накопленной потенциальной энергии в [6] получено выражение для скорости высвобождения (изменения) энергии в виде

$$\frac{de_a(t)}{dt} \propto \frac{1}{\left(1-\frac{t}{t_f}\right)^{\frac{\rho+1}{\rho}}}. \qquad (2)$$

Анализ выражения (2) проводят при условии $t \approx t_f$. Согласно данного условия считается, что $1-\frac{t}{t_f} << 1$. Это обусловлено тем, что при $t=t_f$ наблюдается разрыв функции (2) и энергия АЭ $e_a \rightarrow \infty$. Другими словами, разработанная модель не позволяет проводить анализ излучения АЭ при временах, равным времени разрушения.

**Моделирование сигналов АЭ**

Была разработана модель процесса разрушения композиционного материала и, соответствующая ей, модель сигнала АЭ, которая основана на том, что согласно кинетической теории прочности, процесс разрушения развивается по экспоненциальному закону вида

$$\upsilon = \upsilon_0 \, e^{r\sigma(t)}, \tag{3}$$

где $\upsilon_0$ – начальная скорость разрушения элементов; $\sigma(t)$ – нагрузка (напряжение), приложенная к образцу; $r$ – постоянная, которую определяют из экспериментов. Если нагрузка (напряжение) приложенная к образцу, изменяется по линейному закону $\sigma(t) = \alpha t$, где $\alpha$ – скорость приложения нагрузки (напряжения). С учетом (3) и выражения для скорости изменения оставшихся элементов, согласно в [6], выражение для числа оставшихся элементов будет иметь вид

$$N = N_0 \, e^{-\frac{\upsilon_0}{r\alpha}(e^{r\alpha t}-1)}. \tag{4}$$

Выражение (4) описывает количество оставшихся элементов $N$ при развитии процесса разрушения композиционного материала, состоящего из $N_0$ элементов.

Исходя из (4) в продолжении того, что при разрушении каждого элемента формируются одиночные импульсы излучения одинаковой формы, а их амплитуда зависит от приложенного напряжения, выражение для сигнала АЭ будет иметь вид

$$U(t) = u_0 \, t \; \alpha \; \upsilon_0 \; e^{r\alpha t} \, e^{-\frac{\upsilon_0}{r\alpha}(e^{r\alpha t}-1)}, \tag{5}$$

где $u_0$ – максимально возможное смещение при мгновенном разрушении образца с заданными физико-механическими характеристиками.

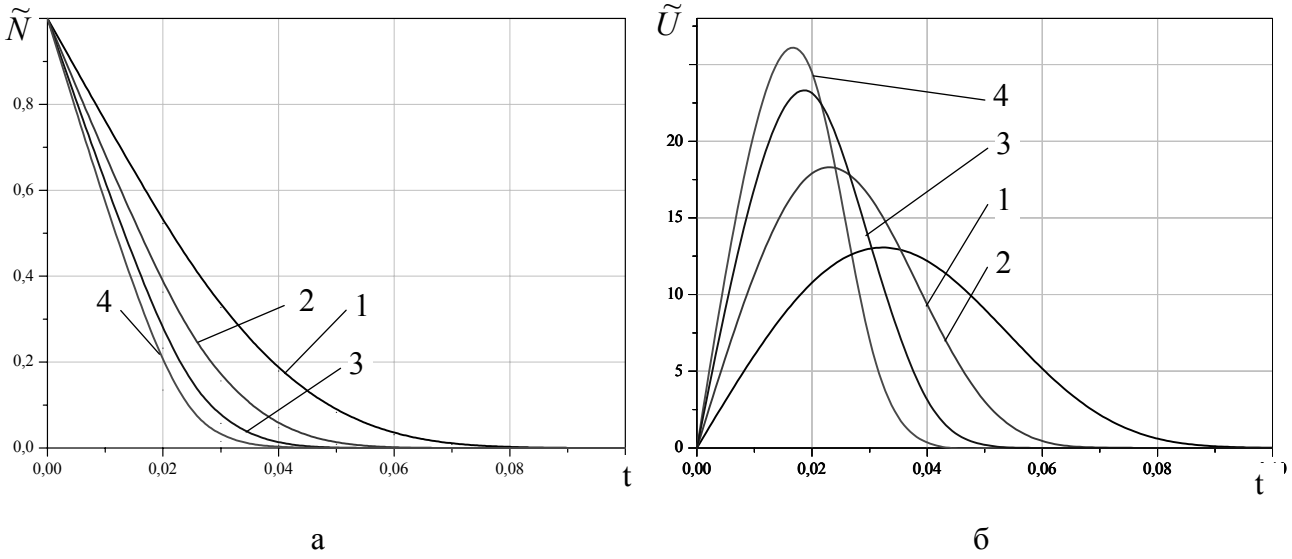
Выражения (4) и (5) позволяют проводить моделирование во времени процессов разрушения элементов и сигналов АЭ. Результаты такого моделирования показаны на рис. 1. При проведении моделирования считалось, что рассматривается один и тот же материал с заданными физико-механическими характеристиками, а размер образца остается неизменным. В качестве изменяемого параметра анализировали параметр $\alpha$, характеризующий изменение скорости приложения нагрузки.

Зависимости (рис.1) построены в виде графиков $\tilde{N}(t) = N(t)/N_0$ и $\tilde{U}(t) = U(t)/U_0$, которые представлены в нормированных единицах. При расчетах параметры, входящие в выражение (4) приведены к безразмерным величинам. Увеличение значения $\alpha$ означает возрастание скорости приложения нагрузки. При построении графиков использовали следующие значения параметра $\alpha$: 25, 35, 45, 55. При этом считали, что начальная скорость $\upsilon_0$ разрушения элементов соответствует скорости приложения нагрузки, т.е. $\upsilon_0 = \alpha$.

Из рис. 1,а видно, что кривые изменения оставшихся (не разрушившихся) элементов во времени носят непрерывный спадающий характер. При увеличении скорости приложения нагрузки (возрастание величины $\alpha$), и, соответственно, возрастании начальной скорости разрушения $\upsilon_0$, происходит увеличение крутизны падения кривых изменения оставшихся элементов и их постепенный сдвиг по оси абсцисс в сторону меньших значений. Это свидетельствует о том, что при большей скорости приложения нагрузки и, соответственно, большей начальной скорости разрушения элементов, полное разрушения материала происходит за меньший промежуток времени.

Из рис.1,б видно, что непрерывность процесса разрушения элементов материала сопровождается формированием непрерывного сигнала АЭ. При этом с увеличением

скорости приложения нагрузки и, соответственно, начальной скорости разрушения элементов материала, происходит увеличение амплитуды сигнала АЭ и их сжатие во времени (рис.1,б). Такое изменение параметров сигналов АЭ обусловлено ускорением протекания процесса разрушения и, соответственно, уменьшением времени его развития. В то же время, задний фронт сигнала АЭ имеет выраженный релаксационный характер своего изменения.




а б

Рис. 1. Изменение количества оставшихся элементов во времени (а), согласно (4), и сигнал АЭ (б), согласно (5), при развитии процесса разрушения элементов во времени. Значения скорости приложения нагрузки $\alpha$ равны: 1 - $\alpha$=25; 2 - $\alpha$=35; 3 - $\alpha$=45; 4 - $\alpha$=55. Значение начальной скорости разрушения элементов $\upsilon_0$ равны: 1 - $\upsilon_0$=25; 2 - $\upsilon_0$=35; 3 - $\upsilon_0$=45; 4 - $\upsilon_0$=55

Полученные результаты имеют хорошее согласование с данными экспериментальных исследований сигналов АЭ регистрируемых при разрушении композиционного материала ВК6. Исследования показали, что при разрушении образцов из сплава ВК6 диаметром 8 мм и толщиной 4 мм с электроискровым надрезом фиксируются одиночные сигналы АЭ. Их появление соответствует моменту времени разрушения образцов. Формы регистрируемых сигналов АЭ подобны формам модельных сигналов с релаксационным характером изменения заднего фронта. С возрастанием скорости приложения нагрузки, как и в модельных экспериментах, наблюдается возрастание амплитуды регистрируемых сигналов АЭ и их сжатие во времени. Однако реальные сигналы АЭ имеют изрезанный задний фронт, что, очевидно, связано с изменением скорости развития процесса разрушения.

## Выводы

Разработанные математические модели для числа оставшихся элементов материала и, соответственно, сигналов АЭ непрерывны во времени, при этом отмечена хорошая согласованность с экспериментальными исследованиями при разрушении композиционных материалов.

При увеличении скорости разрушения композиционного материала, а также скорости приложения нагрузки, накопленное количество элементов резко уменьшается, при этом амплитуда сигнала АЭ увеличивается с одновременным сжатием по времени. Такое изменение параметров сигналов АЭ обусловлено ускорением протекания процесса разрушения и, соответственно, уменьшением времени его развития. Из этого следует, что полное разрушения материала будет происходить за меньший промежуток времени.

При проведении исследований разрушения композиционного материала ВК6 фиксировались одиночные сигналы АЭ с формами, подобные рис.1,б. При увеличении скорости нагружения

в экспериментальных сигналах АЭ наблюдаются закономерности изменения их параметров, аналогично теоретическим исследованиям. При этом реальные сигналы АЭ имеют изрезанный задний фронт, что, очевидно, связано с изменением скорости развития процесса разрушения материала.

В последующих экспериментальных исследованиях планируется провести экспериментальные исследования разрушения композиционных материалов с разными физико-механическими характеристиками, а также постоянными и переменными скоростями приложения нагрузки при различных размерах образцов.

## Список литературы


1. *Smith R.L., and Phoenix, S. L.,* (1981) Asymptotic distributions for the failure of fibrous materials under series-parallel structure and equal load-sharing, J. Ap. Mech., 48, 75-82.

2. *Curtin W. A.,* (1991) Theory of mechanical properties of ceramic-matrix composites, J. Am. Ceram. Soc., 74, 2837-2845.

3. Newman, W. I., and Phoenix, S. L., (2001) Time dependent fiber-bundles with local load sharing, Phys. Rev. E, 63, 021507.

4. *Christian U. Grosse, Masayasu Ohtsu.* Acoustic Emission Testing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, 396 p.

5. *Frank Raischel*. Fiber Models for Shear Failure and Plasticity, Institut f¨ur Computerphysik der Universit¨at Stuttgart , 2007, 124 p.

6. *Coleman, B. D.,* Time dependence of mechanical breakdown phenomena, J. Ap. Phys., 27, (1956), 862-866.

7. *Coleman, B. D.,* Statistics and time dependence of mechanical breakdown in fibers, J. Ap. Phys., 29, (1958), 968-983.

8. *Robert Shcherbakov*. On modeling of geophysical problems, Ph.D. Cornell University 2002, 196 p.

УДК 621.891

*В.М. Стадніченко, к.т.н., О.М. Трошін*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЗМІВ НАПРАВЛЕНОГО МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ ПРИ ТЕРТІ В УМОВАХ УПРАВЛІННЯ ТЕПЛОВИМ ПОТОКОМ

*В статті теоретично обосновані і практично реалізовані шляхи кардинального підвищення зносостійкості тріболологічних спряжень шляхом управління тепловим потоком.*

**Вступ**. Використання ефекту «беззносне» тертя може бути покладене в основу створення трібосистем, що володіють високим ресурсом і максимальною надійністю. Найбільшого значення при реалізації цього явища набувають утворення різних тонкоплівкових структур при терті. Термодинамічні умови появи такого роду структур на поверхні тертя приведені в роботах по нелінійній термодинаміці і самоорганізації нерівноважних систем [1, 2, 3].

**Аналіз літератури**. Найбільш відомим механізмом переходу трібосистеми в «квазібеззносний» стан є явище «вибіркового» перенесення. Однак, спроби перенести ефект «вибіркового» перенесення на інші класи трібосистем не дав позитивних результатів, що пов'язано з відсутністю умов протікання трібохімічної активації в мастильних середовищах реальних трібосистем. У той же час аналіз літературних джерел присвячених дослідженню умов переходу трібосистем в умови нерівноважного самовпорядкування, дозволяють припустити наявність масоперенесення для трібосистем – сталь – мідні сплави за рахунок динамічної дифузії [4, 5]. Як показали дослідження, що проведені авторами роботи [6, 7] умовою виникнення і подальшого протікання подібного механізму дифузії є перехід поверхневих шарів матеріалів трібосистем в нерівноважний стан за рахунок оптимізації теплового потоку, що потребує експериментальних доказів.

**Результати дослідження**. Для проведення досліджень на знос були використані елементи зі сталі 40 (рухомий) та бронзи БрА9ЖЗЛ (нерухомий). Розміри досліджуваних елементів склали: діаметр $R_{обр}$=25мм, товщина $L$=15мм. Вибір даних матеріалів обумовлений їх широким використанням в качаючих вузлах об'ємних гідромашин.

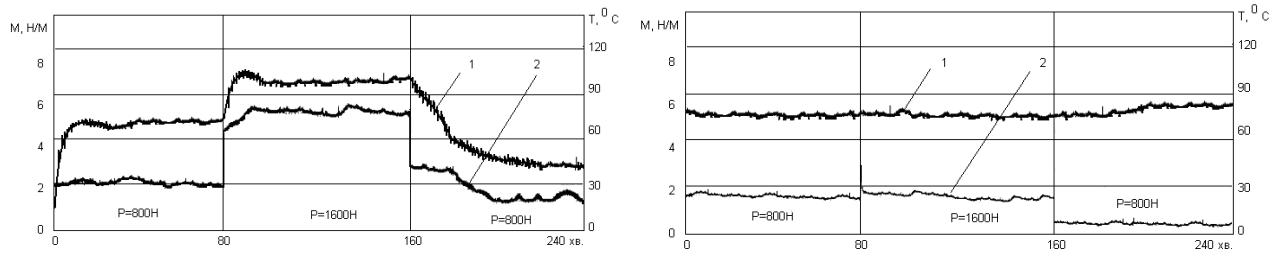
Випробування елементів проводилися на розробленому автоматизованому комплексі трібодіагностики [5] з використанням конструктивної схеми «диск-диск». Попереднє припрацювання здійснювалась до утворення плями контакту $20\ мм^2$ за допомогою дрібнодисперсної шліфувальної бумаги. Як мастильний матеріал використовувалась авіаційна олива Б-3В. Випробування на тертя та зношування проводили в камері, що була складовою частиною автоматизованого комплексу трібодіагностики, яка дозволяє робити безперервну реєстрацію трібологічних параметрів на ПЕОМ, а також проводити регулювання температури в ефективному об'ємі взаємодії.

Безперервна реєстрація інтенсивності зношування здійснювалася за допомогою методу акустичної емісії, відповідно до методики, викладеної в роботі [5]. Випробування проводилися в два етапи. На першому етапі досліджувався процес рівноважного самовпорядкування трібосистеми, при якому дисипація теплової енергії від сил тертя проводилась за рахунок конвективного теплообміну з поверхні обох зразків. При цьому навантаження в процесі випробувань змінювалось за програмою 800 Н, 1600 Н, 800 Н. Час роботи трібосистеми на кожному прикладеному навантаженні складав 80 хв. Загальний час безперервних випробувань складав 4 години. Вимірювання зносу трібоелементів виконували за методом штучних баз. Випробування проводилися у камері конструктивне виконання якої дозволяло автоматизованому комплексу трібодіагностики підтримувати постійну температуру в ефективному обсязі взаємодії на рівні $80^{\circ}C$ для кожної серії випробувань, при цьому відбувалося нагрівання нижньої частини камери і охолодження верхньої частини камери на протязі всього експерименту.

На другому етапі методика випробувань була обрана з урахуванням реалізації умов виникнення нерівноважного самовпорядкування при управлінні енерго-масоперенесенням, обґрунтованих на основі положень нелінійної термодинаміки і механіки твердого тіла. Слід

зазначити, що реалізація умов нерівноважного самовпорядкування відбувалося після закінчення припрацювання трібосистеми, тобто її переходу в стійкий рівноважний стан.

У ході проведення досліджень, як на першому так і на другому етапах проводилась реєстрація параметрів, що характеризують роботу трібосистеми, а саме: момент тертя $M_{mp}$, температура в зоні контакту трібосистеми $T$, усереднена потужність сигналів акустичної емісії $W_{ус}$, величина зносу $I_m$. Зміна основних інформативних параметрів ($M_{mp}$, $T$), що реєструвались у ході проведення першого етапу випробувань приведена на рис. 1, а.

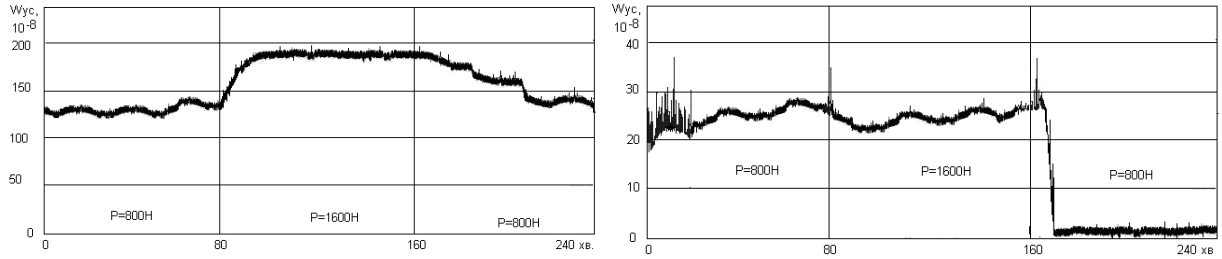



*а* *б*

Рис.1. Зміна моменту тертя ($M_{mp}$) і температури в зоні контакту ($T$) від часу проведення випробувань Сталь 40 – БрА9ЖЗЛ де 1 – $T$, 2 –$M_{mp}$: *а* – рівноважне самовпорядкування; *б* – нерівноважне самовпорядкування

Зміна усередненої потужності акустичної емісії $W_{ус}$ випромінювання, що реєструвалась при рівноважному самовпорядкуванні трібосистеми 40Х – БрА9ЖЗЛ приведена на рис. 2, а.

Зміна основних інформативних параметрів ($M_{mp}$, $T$), що реєструвались у ході проведення другого етапу випробувань (нерівноважне самовпорядкування) приведена на рис. 1, б. Зміна усередненої потужності акустичної емісії випромінювання $W_{ус}$, що реєструвалась при нерівноважному самовпорядкуванні трібосистеми 40Х – БрА9ЖЗЛ приведена на рис. 2, б.




*а* *б*

Рис. 2. Зміна усередненої потужності акустичної емісії $W_{ус}$ від часу проведення випробувань сталь 40 – БрА9ЖЗЛ: а – рівноважне самовпорядкування; б – нерівноважне самовпорядкування

В табл. 1 приведені значення інтенсивності зношування стального і бронзового зразків, а також сумарної інтенсивності зношування трібосистеми при різних механізмах самовпорядкування поверхневих шарів.

Результати обробки вимірювальних параметрів, що характеризують роботу досліджуваної трібосистеми ($M_{mp}$, $W_{ус}$, $T$=80°С) при рівноважному і нерівноважному самовпорядкуванні поверхонь контакту при зміні робочого навантаження повністю повторюються. табл. 1, і 2.

*Таблиця 1*

Величина лінійної інтенсивності зношування елементів трібосистем

| Механізм самовпорядкування | Сумарна інтенсивність зношування | Інтенсивність зношування стального елемента | Інтенсивність зношування бронзового елемента |
|---|---|---|---|
| Рівноважне самовпорядкування | 288 $\times 10^{-10}$м/м | $70\times 10^{-10}$м/м | $218\times 10^{-10}$м/м |
| Нерівноважне самовпорядкування | $54\times 10^{-10}$м/м | $12\times 10^{-10}$м/м | $42\times 10^{-10}$м/м |

Однак при збільшенні робочого навантаження з 800 до 1600 Н, середні значення $M_{тр}$, $W_{ус}$ практично не змінюються після стабілізації даних параметрів по закінченню вторинного припрацювання трібосистеми. Час вторинного припрацювання при зміні прикладеного навантаження при нерівноважному самовпорядкуванні трібосистеми значно менше часу вторинного припрацювання трібосистеми при рівноважному самовпорядкуванні поверхонь трібоконтакту (табл. 3).

*Таблиця 2*

Середні значення вимірювальних параметрів трібосистеми при рівноважному само впорядкуванні

| Прикладене навантаження | Момент тертя $M_{тр}$, Н/м | Температура в зоні трібоконтакту, $T$,°С | Усереднена потужність АЕ випромінювання $W_{ус}$, $10^{-8}$ Вт |
|---|---|---|---|
| 800 | 2 | 68 | 125 |
| 1600 | 5,7 | 104 | 180 |
| 800 | 1.6 | 36 | 175 |

При подальшому зменшенні навантаження з 1600 Н до 800 Н, має місце значне зменшення середніх значень приведених вище параметрів трибосистеми, до рівня значно меншого ніж рівня аналогічного етапу роботи трібосистеми при рівноважному самовпорядкуванні поверхневих шарів (табл. 2).

*Таблиця 3*

Середні значення вимірювальних параметрів трібосистеми при нерівноважному само впорядкуванні

| Прикладене навантаження | Момент тертя, $M_{тр}$, Н/м | Температура в зоні трібоконтакту, $T$,°С | Усереднена потужність АЕ випромінювання $W_{ус}$, $10^{-8}$ Вт |
|---|---|---|---|
| 800 | 1,8 | 80 | 26 |
| 1600 | 1,8 | 80 | 26 |
| 800 | 0,4 | 80 | 2 |

Результати фрактографічних досліджень, а також дослідження хімічного складу поверхонь тертя табл. 4, показали, що при рівноважному самовпорядкуванні трібосистеми має місце нормальне механо-хімічне зношування поверхонь тертя, що характеризується насиченням поверхневих шарів елементів трібосистеми киснем і гідроксильними групами СН. Для сталі та бронзи процентний відсоток СН і $O_2$ мали наступні значення 5,324% і 2,184%, відповідно (табл. 4). Значення величини інтенсивності зношування для стального і бронзового трібоелементів показали, що при рівноважному самовпорядкуванні поверхневих шарів трібосистеми, в основному зношується бронзовий трібоелемент (табл. 4), його інтенсивність зношування в 3,142 рази більше ніж стального трібоелемента.

*Таблиця 4*

Хімічний склад матеріалів трібосистем на початку випробувань та при зміні механізмів самовпорядкування поверхневих шарів

| Вихідний хімічний склад елементів трібосистеми | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 40Х | C | | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Cu | |
| | 0,36-0,44 | | 0,17-0,37 | 0,50-0,080 | до 0,30 | до 0,035 | до 0,035 | 0,80-1,10 | 0,123 | |
| БрА9ЖЗЛ | As | | Sb | Sn | Si | Ni | Fe | Zn | Mn | Cu |
| | 0,05 | | 0,05 | 0,2 | 0,2 | 1,0 | – | 1,0 | 0,5 | 97 |
| Хімічний склад елементів трібосистеми при рівноважному самовпорядкуванні | | | | | | | | | | |
| 40Х | СН+$O_2$ | | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Cu | |
| | 5,324 | | 0.29 | 0,521 | 0,184 | 0,141 | 0,000 | 0,927 | 0,220 | |
| БрА9ЖЗЛ | As | СН+$O_2$ | Sb | Sn | Si | Ni | Fe | Zn | Mn | Cu |
| | 0 | 2,184 | 0,000 | 0,737 | 0,186 | 0,730 | – | 0,970 | 0,384 | 95,124 |
| Хімічний склад елементів трібосистеми при нерівноважному самовпорядкуванні | | | | | | | | | | |
| 40Х | СН+$O_2$ | | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | Cu | Zn |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 24,446 | | 0,137 | 0.448 | 0,772 | 0,430 | 0,052 | 0.841 | 8,425 | 0,250 |
| БрА9ЖЗЛ | As | $CH+O_2$ | Sb | Sn | Si | Ni | Fe | Zn | Mn | Cu |
| | 0 | 25,373 | 0,000 | 1,354 | 0,176 | 0,312 | – | 1,123 | 0,386 | 91,384 |

У поверхневому шарі стального трібоелемента після його нерівноважного самовпорядкування значно зменшується вміст кремнію з 0,37% до 0,137%, при цьому одночасно збільшився процентний зміст сірки з 0,035% до 0,430%, що пояснюється дією протизадирних присадок у мастильному середовищі Б-3В (табл. 4).

Крім того на поверхні стального трібоелемента на порядки збільшується вміст міді, з 0,123% до 8,425%, що також значно перевищує вміст міді у поверхневому шарі стального трібоелемента при рівноважному самовпорядкуванні трібосистеми 0,22%. Також на поверхні стального зразка при нерівноважному самовпорядкуванні з'являється цинк 0,25%.

Згадана зміна хімічного складу поверхні тертя стального трібоелемента свідчить про наявність масоперенесення міді та цинку з поверхні бронзового трібоелемента. При цьому механізм зношування, що має місце при наявності такого масоперенесення неможливо віднести до патологічних видів зношування (схоплення І-го чи ІІ-го роду), оскільки поверхні тертя елементів трібосистеми значно вигладжена.

Збільшення відсоткового вмісту CH і $O_2$ у поверхневих шарах її елементів при нерівноважній самоорганізації свідчить, що поверхні тертя збільшили свою пористість. Пориста структура має властивість, деформуючись без руйнування за рахунок великої кількості мод деформації вигинів та повороту, а також пориста структура має властивість адсорбування мастильного матеріалу за рахунок капілярного ефекту. Слід відмітити, що висока пористість структури характерна і для поверхневих шарів елементів трібосистем при «вибірковому» переносі. Даний факт пояснює відсутність збільшення значень $M_{mp}$, та $W_{yc}$ (інтенсивності зношування) при збільшенні прикладеного навантаження з 800 Н до 1600 Н, що має місце при нерівноважному самовпорядкуванні трібосистеми, та подальше значне зменшення значень цих параметрів при розвантаженні трібосистеми до початкового рівня у 800 Н.

Пориста структура, що спостерігається на поверхні стального трібоелемента грає роль дисипативної системи, що самовпорядковується за рахунок зовнішніх чинників та розвитку внутрішньої нестійкості структури, яке приводить до мікрофрагментації цього матеріалу.

## Висновки

Таким чином за допомогою управління тепловим потоком трібосистеми розширений діапазон використання ефекту «вибіркового» перенесення для трібосистем «сталь–бронза» без спеціальних добавок у мастильний матеріал.

## Список літератури


1. Николис Г. Познание сложного. / Николис Г., Пригожин И.Введение: пер. с англ. – М.:, 1990. – 344 с.

2. Пригожин И. Порядлок из хаоса: Новый диалог человека с природой./ Пригожин И., Стенгерс И. – М.: Прогресс, 1986. – 342 с.

3. Арнольд В.И. Теория катастроф. / Арнольд В.И. М.:Наука. 2000. – 128 с.

4. Иванова В.С. Анализ критических точек трибосистемы на стадии приспосабливаемости с позиции синергетики. / Иванова В.С., Семенов Б.И., Браун Э.В. // Вестник машиностроения, 1998. – №10. – С. 3-11.

5. Стадниченко В.Н. Моделирование процесса диссипации энергии фрикционного узла в процессе эксплуатации. Стадниченко В.Н., Налисный Н.Б., Трошин О.Н. // Вісник інженерної академії наук, 2006. – №2-3. С. 60-63.

6. Иванова В.С. Синергетика: прочность и разрушение металлических материалов. / Иванова В.С.– М.: изд. РАН. – 1992. 160с.

7. Пашечко М.І. Вплив поверхневої сегрегації атомів на трибологічні властивості сплавів / Пашечко М.І., Поплавський О.В.// Проблеми трибології. – 2001. – №4. – С. 115-125.

УДК 004.67(045)

*В.М. Мокійчук, к.т.н., А.В. Переїденко*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ПОБУДОВА СИСТЕМ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ЕЛЕМЕНТІВ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

*В даній статті розглянуто реалізацію системи неруйнівного контролю елементів авіаційних конструкцій з використанням середовища розробки LabVIEW 8.5. Система може бути використана як в промислових, так і в лабораторних умовах. Використовується вібраційний та акустичний методи неруйнівного контролю.*

Під час експлуатації різні конструктивні елементи авіаційних конструкцій піддаються різного роду дефектам, які у свою чергу не завжди виявляються в макроскопічних масштабах. Наприклад, пошкодженість на інкубаційній стадії утоми матеріалів реалізується на мікроструктурному розмірному рівні і характеризується відхиленням від початкових значень певних фізико-механічних властивостей матеріалу (внутрішнього тертя, питомого залишкового опору, модуля пружності). Існує велике різноманіття методів проведення неруйнівного контролю авіаційних конструкцій, кожен з яких є найбільш ефективним для діагностики конкретних технічних вузлів та конкретних типів дефектів. Так, наприклад, проведення капітального ремонту газотурбінних авіадвигунів передбачає застосування методів вібраційної і акустичної діагностики елементів конструкцій. А широке поширення останніми роками в авіаційній промисловості композиційних матеріалів, що мають значні відмінності характеристик їх складових і тому характеризуються широкою номенклатурою можливих дефектів, часто індивідуальною, для кожної з можливих композицій, передбачає застосування методів експрес контролю, що дозволяють виявляти широкий спектр можливих дефектів зазначених матеріалів. Таким методом є імпедансний метод неруйнівного контролю. Метод заснований на впливі дефекту багатошарової конструкції на її механічний імпеданс. Механічний імпеданс є комплексною величиною і має активну і реактивну складові. Активна складова імпедансу характеризує невідворотні втрати. Останні обумовлені поглинанням в матеріалі системи, втратами енергії в навантаженні і елементах кріплення, а також випромінюванням пружних хвиль в навколишнє середовище. Реактивна складова імпедансу характеризує кінетичну і потенційну енергію, що запасається і віддається реактивними елементами системи. Реактивними елементами системи є інерційність і пружність. Інерційність пов'язана з накопиченням кінетичної енергії рухомою масою, пружність - з потенційною енергією пружного елементу. Метод дозволяє виявляти непроклеювання, розшарування, порушення цілісності сотового заповнювача, а також ряд інших дефектів, що призводять до зміни фізико-математичних харак-теристик матеріалів. Основними інформативними параметрами для імпедансного методу є, залежно від типу збудження перетворювача, амплітуда або фаза, енергія сигналу, кумулятивна і миттєва фази, частота несучої сигналу. Одним із методів обробки інформаційних сигналів, які дозволяють виділити частотне і фазове зміщення є перетворення Гільберта.

Застосування інформаційних технологій і сучасного програмного забезпечення в процесі проектування і розробки апаратури неруйнівного контролю відкриває нові можливості для створення апаратно-програмних комплексів реєстрації сигналів контролю, а також їх подальшої статистичної обробки і аналізу. Сучасні обчислювальні системи, пристрої збору і обробки сигналів дозволяють реалізувати алгоритми аналізу високої складності, що дає можливість виділяти з інформативних сигналів більшу кількість параметрів, які надалі можна застосовувати як інформативні, підвищуючи тим самим достовірність контролю [1].

Для проведення моніторингу технічного стану об'єкту контролю в сучасних засобах контролю застосовується технологія з безперервною реєстрацією сигналів. Така технологія для забезпечення проведення повноцінного моніторингу вимагає виконання великої

кількості складних операцій, реєстрації, запам'ятовування і збереження, а також неперервної обробки достатньо великого об'єму інформації. Рішення про результат контролю приймається відповідно до заданих критеріїв бракування.

Таким чином, задача розробки і впровадження систем неруйнівного контролю елементів авіаційних конструкцій є достатньо актуальною.

В даній роботі описані методи побудови систем неруйнівного контролю для основних вузлів авіаційних конструкцій, що реалізують низькочастотний (0...25 кГц) віброакустичний метод вільних коливань, а також імпедансний метод контролю.

Для побудови систем неруйнівного контролю було використано обладнання і технології фірми National Instruments. Система контролю реалізується на базі платформи cDAQ, ключовим елементом якої є 8-слотове шасі cDAQ 9172 з пропускною здатністю до 3,2 Мб/с. Зв'язок з комп'ютером здійснюється через інтерфейс USB 2.0, що дає можливість використовувати систему як в стаціонарному, так і в мобільному режимах.

До складу системи неруйнівного контролю також входять:

– 4-х канальний аналого-цифровий перетворювач NI 9215 (динамічний діапазон ± 10В, розрядність 16 біт, частота дискретизації 100кГц/канал);

– 4-х канальний цифро-аналоговий перетворювач NI 9263 (динамічний діапазон ± 10В, розрядність 16 біт, частота дискретизації 100кГц/канал);

– набір стандартних датчиків;

В якості середовища розробки програмного забезпечення систем контролю був використаний програмний комплекс LabVIEW 8.5. Програмування в середовищі National Instruments LabVIEW 8.5 відбувається графічно з використанням мови G, тобто відсутній звичайний текстовий опис алгоритму на мові програмування високого рівня. Інженеру досить скласти блок-схему алгоритму і внести її до програми.

Система є апаратно-програмним комплексом для виділення та обробки інформативних характеристик сигналів датчиків. Середовище LabVIEW дозволяє використовувати стандартну бібліотеку функцій для обробки сигналів без істотного ускладнення структури програмного забезпечення [2]. Існує можливість підключення та інтеграції в основний код програми системи неруйнівного контролю раніше створених програм на мовах високого рівня, працювати з динамічними бібліотеками DLL, розширювати систему додатковими програмними модулями та функціями [3].

Функціональна схема системи контролю показана на рис. 1.

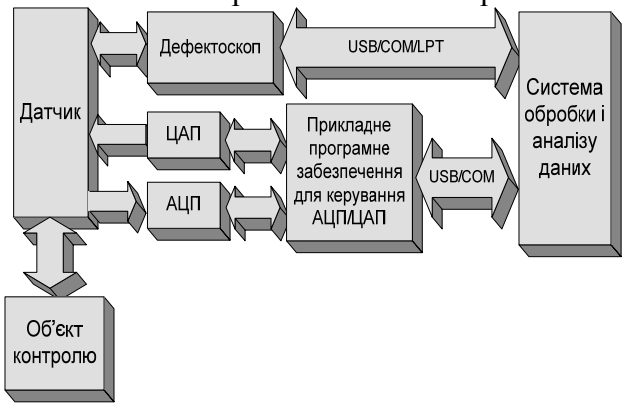



Рис. 1. Функціональна схема системи контролю

В процесі роботи системи з цифро-аналогового перетворювача поступає сигнал збудження датчика. Датчик після контакту з об'єктом контролю видає на виході первинний сигнал, який поступає на вхід аналого-цифрового перетворювача, де здійснюється його перетворення у цифровий вид. Далі сигнал з аналого-цифрового перетворювача через шасі cDAQ 9172 та інтерфейс USB 2.0 передається до персонального комп'ютера, де з використанням спеціального прикладного програмного забезпечення виконується його подальша обробка і аналіз.

Обробка результатів вимірювального експерименту базується на статистичному аналізі масиву отриманих даних і при великих об’ємах інформації виникає необхідність в автоматизації даного процесу. Статистична обробка результатів експерименту складається із декількох етапів, серед яких визначення статистичних характеристик, виключення аномальних значень, перевірка отриманих даних на відповідність теоретичному закону розподілу, оцінка достовірності контролю.

Виходячи з вище переліченого авторами був створений програмний модуль автоматичної статистичної обробки і аналізу результатів вимірювань, що дозволяє: визначати основні параметри розподілу вхідної величини, перевіряти згоду закону розподілу отриманих вибірок з теоретично заданим, виконувати перевірку гіпотези про Гаусів закон розподілу, зберігати проміжні та кінцеві результати аналізу даних експерименту. Необхідно відзначити, що існує можливість його взаємодії із зовнішніми джерелами даних на високому рівні. Даний підхід дозволяє використовувати в якості джерел даних як текстові файли з фізичного носія даних, так і первинні вимірювальні перетворювачі та інші зовнішні пристрої, що функціонують в режимі реального часу і здійснюють зв’язок із комп’ютером через високошвидкісні інтерфейси передачі даних (USB, PCI, PCIe), з подальшою оцифровкою аналогових сигналів від них. Програмний код програми статистичної обробки і аналізу результатів вимірювань представлений на рис. 2.

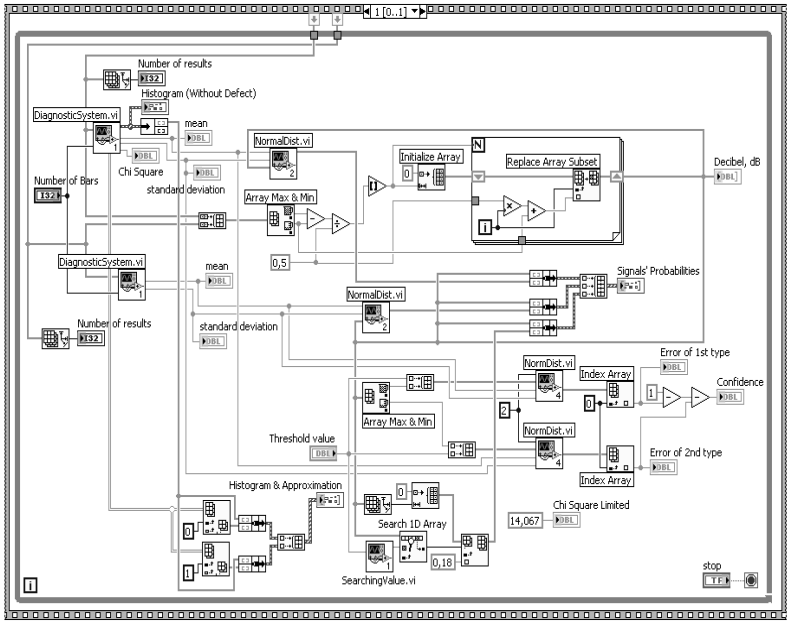



Рис. 2. Програмний код модуля обробки даних

Програмний код системи неруйнівного контролю, що реалізує метод вільних коливань та імпедансний метод контролю зображена на рис. 3, 4 відповідно.

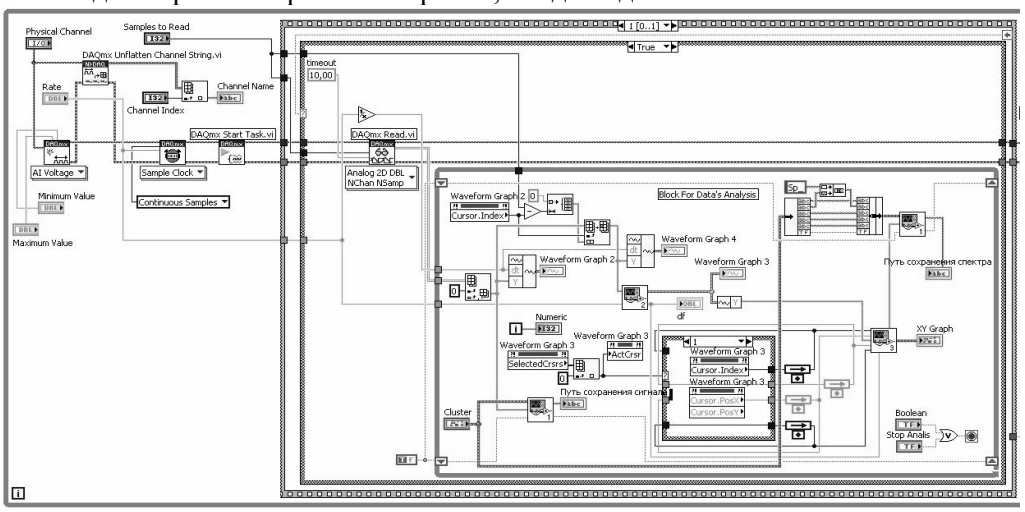



Рис. 3. Програмний код системи неруйнівного контролю методом вільних коливань

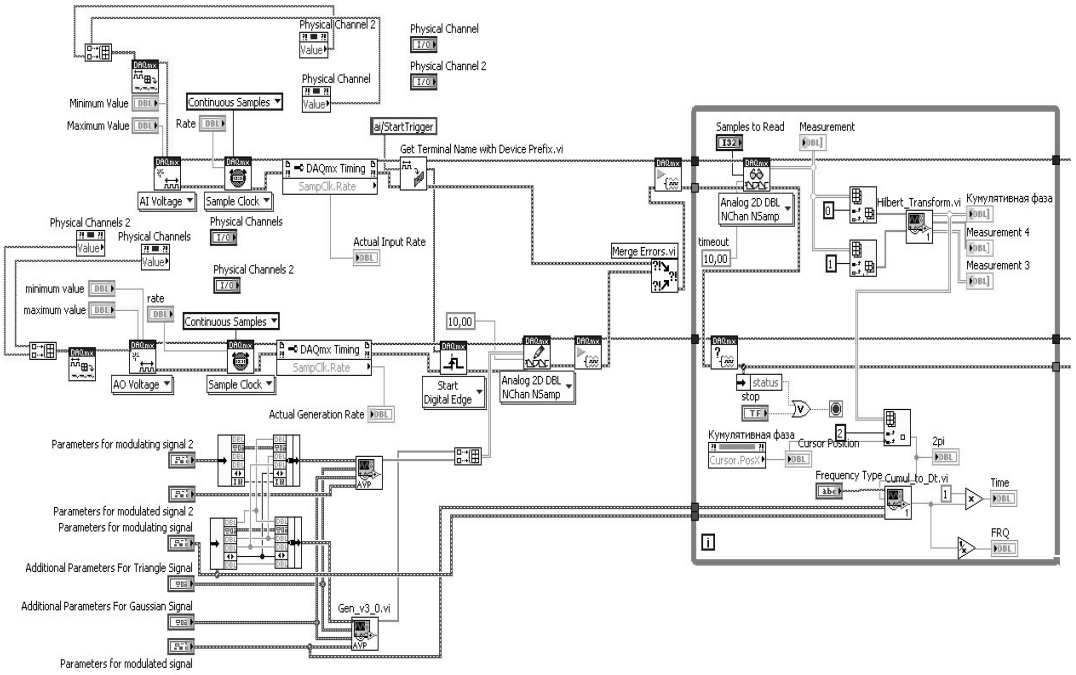



Рис. 4. Код основної програми системи імпедансного контролю композиційних матеріалів

## Висновки

Запропонований підхід дозволяє отримати більше інформації про технічний стан об'єктів, що підлягають контролю, спрощує процес визначення появи аномалій, тенденції їх розвитку, підвищує достовірність прийняття рішення, що у свою чергу може значно підвищити якість проведення вимірювальних робіт, понизити часові витрати на обробку і аналіз результатів вимірювань, дати інженерові новий клас інструментів діагностики об'єктів контролю і оптимізації рішень.

Висока степінь універсальності досягається завдяки модульній структурі побудови функціональних блоків системи контролю, підсистеми аналізу та обробки даних, що дозволяє без ускладнень додавати необхідні або виключати непотрібні методики аналізу сигналу. Принципи, що закладаться в систему, на етапі проектування, дозволяють виконувати її модернізацію і адаптацію до зміни умов роботи без внесення значних змін до структури програмного забезпечення.

Представлені системи контролю успішно застосовується для відпрацювання методик неруйнівного контролю авіаційних конструкцій, а також в учбовому і дослідницькому процесі з тематики неруйнівного контролю в науково-дослідній лабораторії на кафедрі інформаційно-вимірювальних систем Національного авіаційного університету.

## Список літератури

1. *Клименко С.М., Михайленко В.І., Сарафанкж Б.М.* Алгоритм мікропроцесорної обробки результатів ультразвукового контролю// Матеріали 4-ої Національної науково-технічної конференції і виставки „Неруйнівний контроль та технічна діагностика". - Київ, 2003, С. 273-276.

2. *Суранов А.Я.* LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. – М.:ДМК пресс, 2007.-536 с.

3. *Евдокимов Ю.К., Линдваль В.Р., Щербаков Г.И.* LabVIEW для радиоинженера: от виртуальной модели до реального прибора. Практическое руководство для работы в программной среде LabVIEW. – М.:ДМК Пресс, 2007. – 400 с.

УДК 004.272.43 (045)

*В.С. Єременко, к.т.н, Є.Ф. Суслов, аспірант, А.В. Переїденко, В.О. Роганьков*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*В даній статті розглянуто реалізацію автоматичної системи прийняття рішення за результатами неруйнівного контролю композиційних матеріалів методом акустичного імпедансу. В якості середовища розробки програмного забезпечення було використано LabVIEW 8.5. Представлена система може бути використана як в промислових, так і в лабораторних умовах.*

Останніми роками в авіаційній промисловості широкого поширення набули композиційні матеріали. Якщо раніше частка композитів по відношенню до інших конструкційних матеріалів, що використовуються в літальних апаратах була порівняно невелика: з них виконувалися лише окремі елементи планера, то зараз вона наближається до 40% для літаків важкої і 80-90% для малої і надмалої авіації. Таке широке розповсюдження подібних матеріалів привело до необхідності розробки досконаліших методів контролю. Необхідно відзначити, що композит через значні відмінності характеристик його складових має широку номенклатуру можливих дефектів, часто індивідуальну, для кожної з можливих композицій.

На сьогоднішній день одним з основних методів експрес контролю є імпедансний. Метод заснований на впливі дефекту багатошарової конструкції на її механічний імпеданс. Механічним імпедансом $Z$ називають комплексне відношення гармонійної збуджуючої сили, що діє на поверхні або в точці механічної системи до середньої коливальної швидкості $v$ у напрямі сили: $Z = \frac{F}{v}$ . Механічний імпеданс є комплексною величиною і має активну $R$ і реактивну $X$ складові. Активна складова імпедансу характеризує невідворотні втрати. Останні обумовлені поглинанням в матеріалі системи, втратами енергії в навантаженні і елементах кріплення, а також випромінюванням пружних хвиль в навколишнє середовище. Реактивна складова імпедансу характеризує кінетичну і потенційну енергію, що запасається і віддається реактивними елементами системи. Реактивними елементами системи є інерційність і пружність. Інерційність пов'язана з накопиченням кінетичної енергії рухомою масою, пружність - з потенційною енергією пружного елементу.

Метод дозволяє виявляти непроклеювання, розшарування, порушення цілісності сотового заповнювача, а також ряд інших дефектів, що призводять до зміни фізико-математичних характеристик матеріалів. Основними інформативними характеристиками сигналу є, залежно від типу збудження перетворювача, амплітуда або фаза.

Подібний підхід може призвести до значного обмеження числа можливих інформаційних ознак, що свідчать про наявність дефекту. З цього можна зробити висновок, що актуальною залишається задача дослідження методів обробки інформаційних сигналів. Одним з таких методів є перетворення Гільберта [1].

Перетворення Гільбетра дійсного сигналу *X(t)* визначеного у всій часовій області - це дійсний сигнал

$$\tilde{X}(t) = H\left[X(t)\right] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{\pi(t-\tau)} d\tau \,. \quad (1)$$

Сума дійсного сигналу і його гильберт-образу $\tilde{X}(t)$ утворює комплексний аналітичний сигнал $Z(t) = X(t) + j\tilde{X}(t)$. Даний комплексний сигнал можна представити в полярних координатах $Z(t) = A(t) \cdot \exp\left[jQ(t)\right]$. Функція $A(t)$ описує обвідну початкового сигналу, а

функція $Q(t)$ задає миттєву фазу даного сигналу залежно від часу. Отже, обвідну сигналу і миттєву фазу можна визначити наступними співвідношеннями:

$$A(t) = \sqrt{X^2(t) + \tilde{X}^2(t)}\,, \qquad (4)$$

$$Q(t) = arctg\left[\frac{\tilde{X}(t)}{X(t)}\right]. \qquad (5)$$

Таким чином, завдяки застосуванню перетворення Гільбетра досить просто визначаються обвідна і миттєва фаза початкового імпульсного сигналу *X(t)* [2].

Миттєва фаза у виразі (5) визначена на інтервалі $[-\pi/2;\pi/2;]$, тому для розрахунку фазової харак-теристики на інтервалі $[0,2\pi]$ дане рівняння необхідно перетворити до наступного вигляду

$$Q(t) = arctg\left[\frac{\tilde{X}(t)}{X(t)}\right] + \frac{\pi}{2}\left[2 - sign\tilde{X}(t)(1 + signX(t))\right]. \quad (6)$$

Система неруйнівного контролю композиційних матеріалів є апаратно-програмним комплексом для виділення та обробки інформативних характеристик сигналів датчиків механічного імпедансу, при цьому застосовується технологія з безперервною реєстрацією сигналів. Середовище LabVIEW дозволило використовувати перетворення Гільбетра без ускладнення програмного забезпечення [3]. Функціональна схема системи показана на рис. 1.

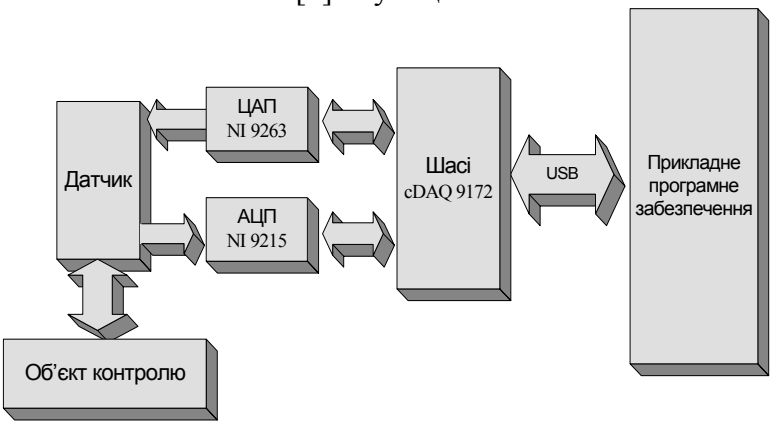



Рис. 1. Функціональна схема системи контролю

В процесі роботи системи з цифро-аналогового перетворювача поступає сигнал збудження датчика імпедансу. Датчик після контакту з об'єктом контролю видає на виході первинний сигнал, який поступає на вхід аналого-цифрового перетворювача, де здійснюється його перетворення у цифровий вигляд. Далі сигнал з аналого-цифрового перетворювача через шасі cDAQ 9172 та інтерфейс USB 2.0 передається до персонального комп'ютера, де з використанням спеціального прикладного програмного забезпечення виконується його подальша обробка і аналіз.

Таким чином виникає задача статистичної обробки великих масивів експериментальних даних і подальший їх аналіз. Сучасне програмне забезпечення, яке виконує подібні операції є вузькоспеціалізованим, що виключає або накладає істотні обмеження на модернізацію (наприклад, зміна і доповнення переліку алгоритмів, за допомогою яких відбувається аналіз), ускладнює їх інтеграцію з іншими програмними модулями і продуктами, що у свою чергу також не дозволяє повною мірою проводити обробку інформаційного сигналу, і не забезпечує необхідну достовірність контролю.

Сигнал, амплітуда якого перевищує заданий поріг, фіксується апаратурою контролю. Така технологія для забезпечення проведення повноцінного моніторингу вимагає або багатократного контролю з різними рівнями амплітудного порогу, або застосування додаткових рівнів реєстрації для забезпечення можливості спостереження за виникненням дефекту і визначенням тенденції його розвитку. У зв'язку з цим виникає необхідність в

реєстрації, запам'ятовуванні і збереженні, достатньо великого об'єму інформації. Рішення про результат контролю приймається відповідно до заданих критеріїв бракування.

Інформація про стан об'єкту контролю міститься у вимірюванні амплітуд сигналів від дефекту. Для підвищення інформативності базу даних для моніторингу технічного стану об’єкту контроля необхідно формувати на основі оцінок інформативних параметрів сигналів, отриманих в процесі контролю. Ці інформативні параметри по своїй фізичній природі є випадковими дискретними величинами. Враховуючи, що зміни технічного стану об'єктів спостереження в процесі експлуатації виявляються через зміни параметрів вимірювань, а також їх статистичних закономірностей, формування бази даних для моніторингу доцільно здійснювати по статистичних портретах. В процесі контролю формується масив з N вимірювань. Шляхом обробки цих вимірювань можна обчислити кількісні показники контролю будь-якої елементарної ділянки об'єкту контролю. Загальними показниками є: середні значення і вибіркові дисперсії вимірювань.

Якщо отримати вимірювання інформативних параметрів на еталонних зразках, які відповідають якісним і дефектним виробам, то їх можна використовувати для формування вирішальних правил контролю об'єктів, визначення порогових рівнів аномалій і бракування, за допомогою яких можна отримати функції прийняття рішень. Таким чином, статистичний портрет об’єкту контроля при обробці результатів вимірювань включає наступні вихідні дані для моніторингу: порогові рівні дефектів, середні значення вибірок вимірювань, вибіркові дисперсії.

Зміна середнього значення амплітуди прийнятого сигналу зумовлено зміною розмірів дефекту. Таким чином, можна відзначити наявність зв'язку між сформованими за результатами вимірювань неруйнівного контролю статистичними портретами і технічним станом об'єкту контролю. Це дає підставу використовувати їх як базу даних для прийняття рішень в процесі моніторингу.

Для статистичної обробки результатів і підвищення достовірності неруйнівного контролю на кафедрі інформаційно-вимірювальних систем Національного авіаційного університету була створена спеціальна інформаційна система статистичної обробки даних і прийняття рішень. В якості середовища розробки був використаний програмний пакет фірми National Instruments LabVIEW 8.5.

Основний програмний код системи статистичної обробки даних складається з трьох окремих програмних функціональних модулів (підпрограми обчислення основних параметрів сигналу, підпрограми розрахунку параметрів і побудови гістограми, модуль оцінки гіпотези про закон розподілу результатів вимірювань). Існує можливість підключення та інтеграції в основний код програми системи обробки і аналізу результатів вимірювання раніше створених програм на мовах високого рівня, працювати з динамічними бібліотеками DLL, розширювати систему додатковими програмними модулями та функціями.

Функціональні можливості даної системи:

- візуалізація оцифрованого сигналу;
- розрахунок інформативних параметрів інформа-ційного сигналу датчика;
- запис значень будь-якого з вказаних інформативних параметрів;
- побудова часових залежностей інформативних параметрів;
- перевірка гіпотези про Гаусовий закон розподілу параметрів;
- побудова теоретичного закону розподілу пара-метрів;
- розрахунок і побудова гістограм;
- визначення ймовірності працездатного стану;
- визначення ризиків виробника і замовника при контролі параметра;
- обчислення характеристик достовірності контролю;
- робота в режимі реального часу.

Інтерфейс і програмний код інформаційної системи статистичної обробки і аналізу результатів вимірювань представлені на рис.2,3 відповідно.

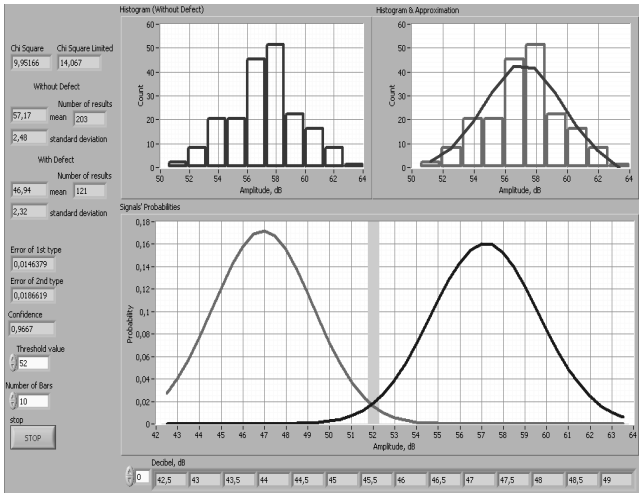



Рис. 2. Інтерфейс системи обробки даних.

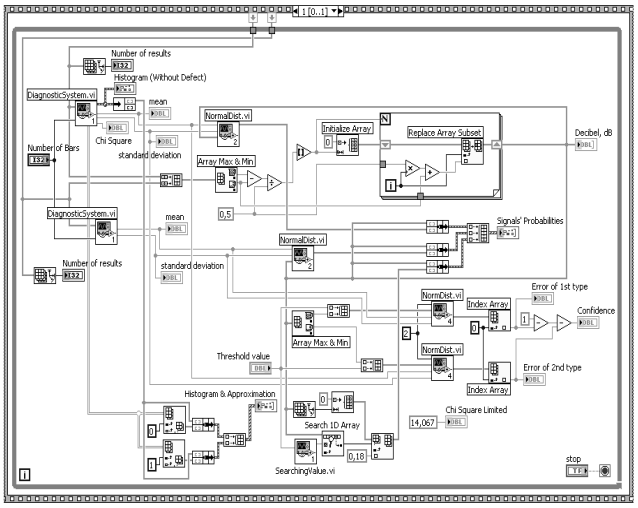



Рис. 3. Програмний код системи обробки даних.

На основі експериментально отриманих даних, з використанням розробленої системи статистичної обробки, можуть бути обчислені математичне сподівання, дисперсія і среднеквадратическое відхилення вибірки експериментальних даних. Використовуючи критерій згоди Пірсона перевіряється несуперечливість гіпотези про Гаусовий закон розподілу отриманих результатів вимірювання. Обчислюються помилки першого і другого роду, а також достовірність контролю. Результатом роботи системи є прийняття рішення про придатність до подальшої експлуатації елементу конструкції чи його бракування.

## Висновки

Запропонована система дозволяє отримати більше інформації про технічний стан об'єктів, що підлягають контролю, спрощує процес визначення появи аномалій, тенденції їх розвитку, підвищує достовірність прийняття рішення, що у свою чергу може значно підвищити якість проведення діагностичних робіт, понизити часові витрати на обробку і аналіз результатів вимірювань, дати інженерові новий клас інструментів діагностики об'єктів контролю і оптимізації рішень.

Принципи закладені в систему, на етапі проектування, дозволяють виконувати її модернізацію і адаптацію до зміни умов роботи без внесення значних змін до структури програмного забезпечення.

Представлена автоматична система прийняття рішень успішно застосовується для відпрацювання методик неруйнівного контролю авіаційних конструкцій, а також в учбовому і дослідницькому процесі з тематики неруйнівного контролю в науково-дослідній лабораторії на кафедрі інформаційно-вимірювальних систем Національного авіаційного університету.

## Список літератури

1. *Еременко В.С. Суслов Е.Ф Овсянкин А.М.* Использование преобразования Гільбетра для анализа сигналов импульсных импедансных дефектоскопов. Физические методы и способы контроля сред, материалов, и изделий (серия); вып. 12: «Электромагнитный, ультразвуковой и оптический неразрушающий контроль» Львів: ФМІ ім. Г.В.Карпенка НАНУ, 2007. С. 69 - 73.

2. *Bendat J.S.* The Hilbert transform and applications to correlation measurements, Bruel and Kjaer, Denmark, 1985

3. *Суранов А.Я.* LabVIEW 8.20: Справочник по функциям. – М.:ДМК пресс, 2007.-536 с.

УДК 004.67(045)

*А.М. Овсянкін, к.т.н, В.С. Єременко, к.т.н., Є.Ф. Суслов, аспірант, В.А. Мотрук*
*(Національний авіаційних університет, Україна)*

# АКУСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ГАБАРИТНИХ КОНСТРУКЦІЙ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*В матеріалах статті розглядаються схеми сканування габаритних конструкцій з склопластиків і аналізуються можливі параметри контролю з метою вибору найбільш інформативних для визначення варіантів сканування.*

Збільшення обсягів використання полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) в конструкціях сучасних повітряних суден ставить актуальною проблему контролю та оцінки технічного стану таких конструкцій в експлуатації.

Для вирішення таких задач найбільш часто використовують низькочастотні акустичні методи [1]. Але зі збільшенням розмірів конструкцій звичайні способи використання акустичних методів пов'язані з великою трудомісткістю і потребують значних витрат часу при контролі. Тому, скорочення часу при вирішенні задач локалізації пошкоджень габаритних конструкцій з ПКМ є актуальною проблемою акустичного контролю в експлуатації.

Основою досліджуваних схем сканування було прийнято використання роздільних збуджувача та приймача, що з'єднані з дефектоскопом АД-60, а приймач, окрім того, з'єднується із системою комп'ютерної обробки інформації через інтерфейсну плату ЕТ-1255.

Для попередніх досліджень використовувалися зразки конструкцій, що являють собою панелі з обшивкою на основі склотканини Т42/1-76 і стільниковим заповнювачем типу ПСП з ударними пошкодженнями визначеного рівня (від 2,297 до 5,109 кДж). Схема розміщування перетворювачів на зразках представлена на рис. 1.

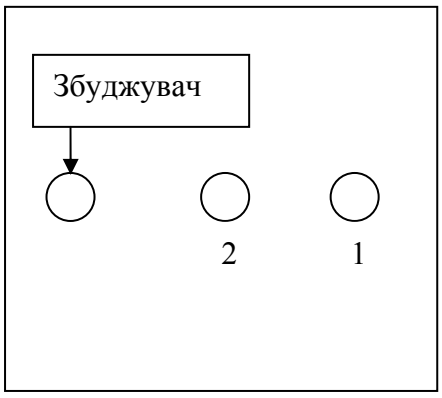



Рис. 1 . Схеми отримання інформації на зразках із склопластику.
1,2 – точки розміщення приймача

Приймач для отримання інформації розташовувався послідовно в точках 1 і 2 (точка 1 – без пошкодження, точка 2 – зона пошкодження, збуджувач встановлювався постійно в одній точці без пошкодження). Зміни амплітудної характеристики сигналу ΔА спостерігаються як в зоні пошкодження, так і в точці, що розташована на відстані від зони пошкодження і на збільшенні відстані від збуджувача. Із залежності можна сказати, що локалізація пошкодження пов'язана з динамікою зміни інформаційного сигналу.

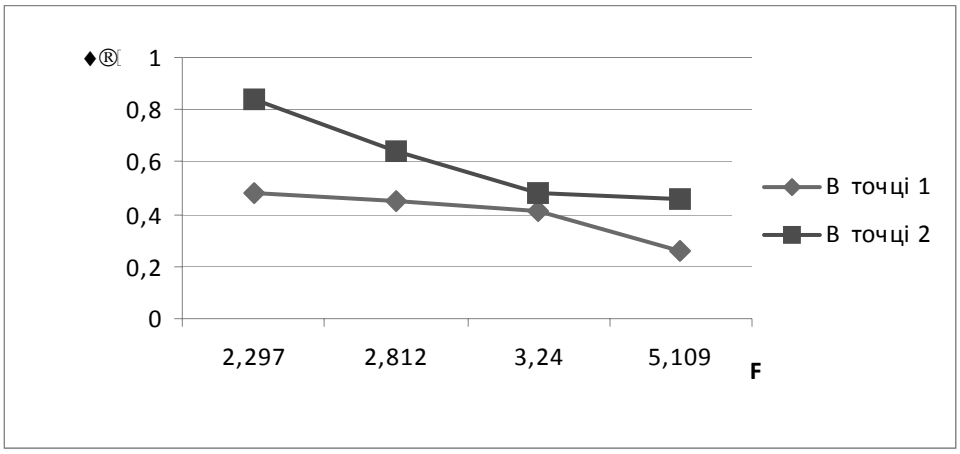



Рис. 2. Залежність амплітудної характеристики сигналу від енергії ударного пошкодження

Для подальших досліджень використовувалася габаритна конструкція на основі склопластику із заповнювачем (фрагмент передньої частини крила повітряного судна довжиною ~ 1м з пошкодженням, що отримано при міцнісних випробовуваннях) – рис. 3.

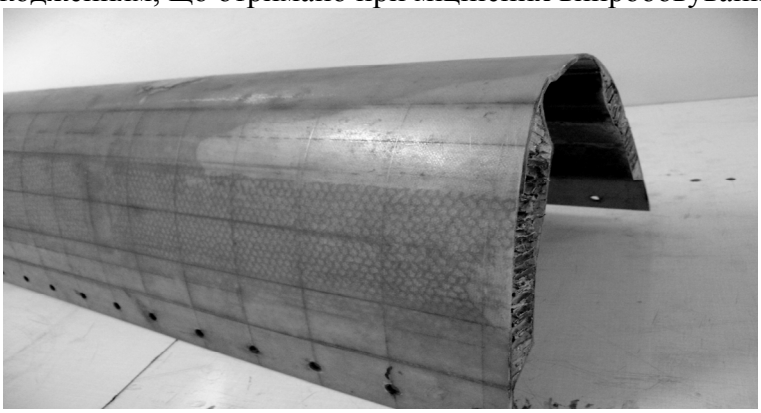


Рис. 3. Пошкоджена зона

Для отримання інформації при скануванні поверхня конструкції поділена на зони у вигляді координатної сітки (рис. 4.) і обрані напрями сканування (у напрямку пошкодження і у напрямку без пошкодження).

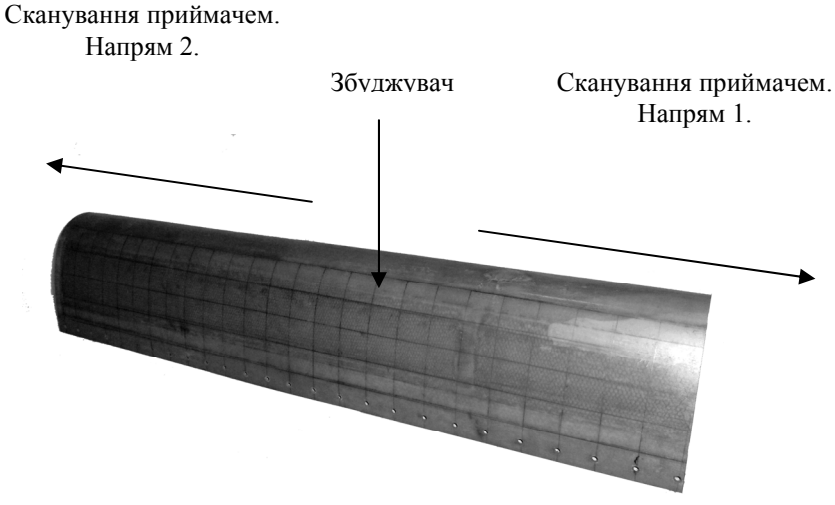



Рис.4. Фрагмент конструкції крила з координатною сіткою

При скануванні п’єзоелектричним приймачем від збуджувача (встановленого в зоні 4-13) по схемі згідно рис. 4 отримано розподіл амплітуди сигналу (за індикатором АД-60), що характеризується його значним зменшенням у зоні пошкодження і близької до неї та малими коливаннями у напрямку без пошкодження.




Рис.5. Значення максимальної амплітуди сигналу у відповідних секторах без комп’ютерної обробки

Підвищення чутливості контролю для таких схем сканування є актуальною задачею і може бути досягнуто цифровою обробкою сигналів від приймача. При цьому з’являється можливість оцінювати акустичні сигнали не тільки за амплітудою, але і за іншими параметрами, наприклад, час затухання сигналу, середня амплітуда та інші.

Система збору та обробки інформації на основі дефектоскопа, персонального комп’ютера і інтерфейсної плати ЕТ-1255 представлена на рис. 6. Статистична обробка інформації проводилась за допомогою програми Mathcad.

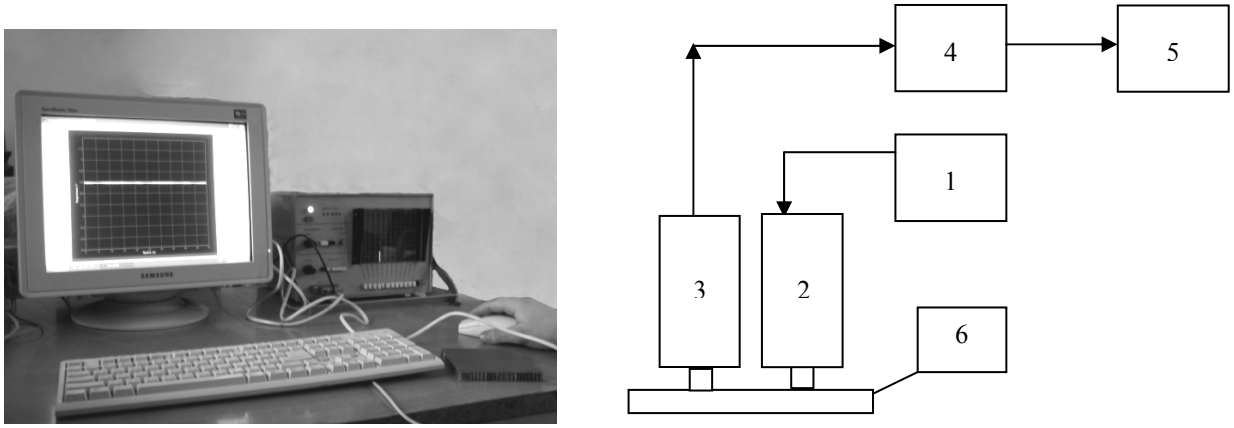



Рис. 6. Система збору та обробки інформації
а - загальний вигляд системи; б - структурна схема системи: генератор збуджуючих імпульсів дефектоскопа АД-60 - 1; збуджувач - 2; приймач мікрофонного або індукційного типу - 3; аналого-цифровий перетворювач (інтерфейсна плата ЕТ 1255) - 4; персональний комп’ютер - 5; досліджувані зразки з ПКМ - 6.

Для оцінки чутливості контролю використовувалися варіанти сканування суміщеним перетворювачем, а також за схемою відповідно рис. 4 з використанням п’єзоелектричного приймача і приймача мікрофонного типу.

На рис. 7 представлені результати сканування конструкції з обробкою сигналів по максимальній амплітуді.

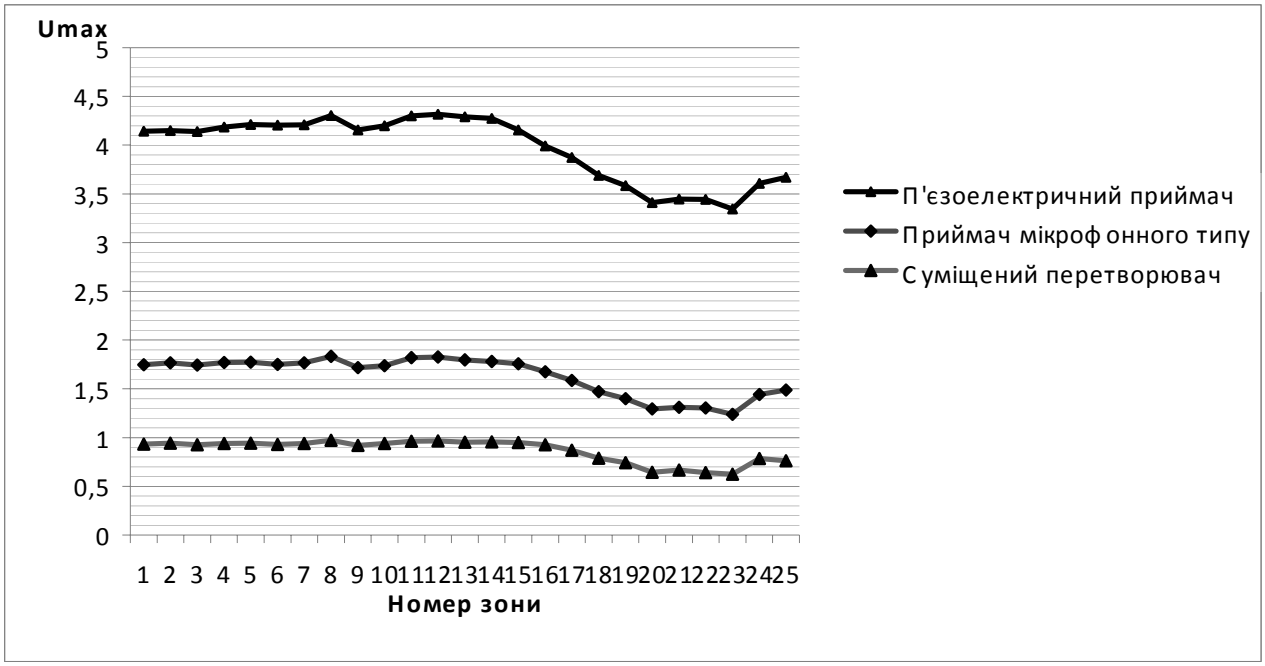



Рис.7. Розподіл максимальної амплітуди сигналу по поверхні конструкції

Із залежності виходить, що максимальна чутливість контролю досягається під час використання п’єзоелектричного перетворювача. Залежність часу згасання сигналів для п’єзоелектричного перетворювача має також виразний розподіл від зони 4-13 в напрямку пошкодження (рис.8).

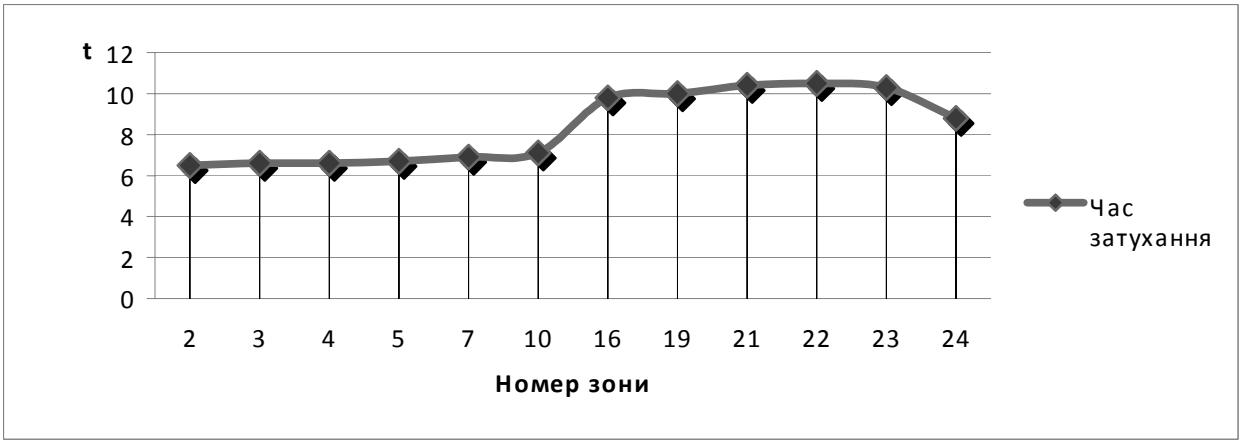



Рис. 8. Залежність часу згасання сигналу від ступеню пошкодження

## Висновки

Запропонований підхід до сканування крупногабаритних конструкцій авіаційного призначення дозволяє значно зменшити часові втрати без суттєвої втрати точності. Використання амплітуди у якості основного інформативного параметра дає можливість відмовитися від складних систем математичної обробки інформаційного сигналу датчика.

## Список літератури

1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. *В.В. Клюева*. Т. 3: Ультразвуковой контроль / *И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге*. - М.: Машиностроение, 2004. - 864 с.

УДК 621.397

*Ю.В. Литвиненко, Ю.В. Погрібна*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ПРИНЦИПИ ОПТИМІЗАЦІЇ АЛГОРИТМІВ КОДУВАННЯ ТЕЛЕВІЗІЙНОГО СИГНАЛУ

*В статті піднімається проблема застосування методів оптимізації кодування цифрового телевізійного сигналу. Розкривається сутність алгоритмів кодування.Наголошується на необхідності вирішення проблеми зниження швидкості передачі цифрового телевізійного сигналу за допомогою кодування.*

Під кодуванням телевізійного сигналу розуміється комплекс перетворень, в результаті яких з аналогового телевізійного сигналу формується цифровий телевізійний сигнал.

Особливості кодування телевізійного сигналу визначаються властивостями самого телевізійного сигналу і законами візуального сприйняття телевізійного зображення. При формуванні цифрового телевізійного сигналу використовуються певні коди . Центральною проблемою цифрового телебачення є зниження швидкості передачі цифрового телевізійного сигналу. Аналіз шляхів вирішення цієї задачі представлений у даній статті.

При кодуванні сигналу кольорового телебачення можливі два підходи: безпосереднє кодування повного телевізійного сигналу і роздільне кодування його компонентів. Такі підходи допускають зменшення швидкості передачі цифрового телевізійного сигналу. При роздільному кодуванні телевізійного сигналу відмінності в обробці складових найбільш поширених форматів телевізійного мовлення СЕКАМ, НТСЦ і ПАЛ практично відсутні, а при безпосередньому кодуванні повного кольорового сигналу на вибір параметрів кодуючого пристрою вид системи кольорового телебачення здійснює суттєвий вплив.

Важливим аспектом кодування телевізійного сигналу є необхідність міжнародного обміну телевізійними програмами, який повинен відбуватися без перетворення цифрових телевізійних сигналів в аналогову форму. Найбільш простим вирішенням цієї задачі міг би бути вибір єдиної міжнародної системи цифрового телебачення. Це висуває додаткові вимоги до кодування телевізійного сигналу.

У кодеку телевізійного сигналу можуть комбінуватися методи диференційної імпульсно-кодової модуляції (ДІКМ) з одновимірним чи двовимірним лінійним перетворенням. Наприклад, гарні результати можна отримати, сполучаючи застосування перетворення Адамара при кодуванні телевізійного сигналу впродовж рядка і методи міжрядкової ДІКМ у вертикальному напрямку. При цьому може бути досягнута висока ефективність кодування – для передачі одного відліку достатньо в середньому 0,5 біт. Допустима ймовірність цифрової помилки складає $10^{-6}$ . Інший підхід полягає у використанні при кодуванні лінійного перетворення ( наприклад, перетворення Фур'є ), і далі здійснюється кодування міжкадрових різниць методом ДІКМ.

Більш широке розповсюдження отримали методи, що комбінують кодування різницевих сигналів і зменшення середньої частоти дискретизації. Такі методи розроблені для роздільного кодування, а в деяких системах цифрового ТБ і для повних сигналів НТСЦ, ПАЛ.

В деяких випадках вказані методи додатково комбінуються із застосуванням оптимального нерівномірного ( ентропійного) кодування, тобто кодів змінної довжини. При цьому швидкість передачі цифрового сигналу знижується в 2- 2,5 разів. Оптимальне нерівномірне ( ентропійне ) кодування включає перетворення коду, наприклад, сформованого в кодері ДІКМ, в код Хафмена і вирівнювання швидкості передачі цифрового потоку за допомогою буферного запам'ятовуючого пристрою.

Необхідно особливо відзначити використання адаптації до змін телевізійного сигналу для підвищення ефективності і якості кодування. Наявність рідких значних стрибків в телевізійному сигналі дозволяє створити ефективні адаптивні кодуючи пристрої. Широке

розповсюдження в цифровому телебаченні отримали, наприклад, адаптивні кодуючи пристрої, що мають кілька шкал квантування. При різкій зміні телевізійного сигналу квантування проводиться по найбільш грубій шкалі, а при незначних відхиленнях сигналу – по найбільш точній. Адаптація може застосовуватись при будь-якому із розглянутих методів кодування телевізійного сигналу.

Зниження швидкості передачі телевізійного сигналу можливо за рахунок зменшення числа біт/відлік. Однак просте зменшення числа рівнів квантування характеристики перетворення призводить до виникнення хибних контурів і спотворенням ділянок зображення, що плавно змінюються. Суб'єктивне сприйняття глибококвантованого зображення можна покращити, застосовуючи спеціальні методи.

Спотворення глибококвантованого зображення при зміні сюжету не помічаються спостерігачем в протягом 0,2- 0,5 с. Це пояснюється тим, що зорова система спостерігача після зміни сюжету поступово нарощує свою гостроту. Протягом цього часу просторова чіткість зображення може бути у 10 разів менше нормальною. Цей ефект використовується методами часового маскування.

Відомо, що шуми в високочастотній частині спектру менш помітні для спостерігача, ніж в низькочастотній області. Покращити суб'єктивну якість зображення можна переносом шумів з низькочастотної області спектру у високочастотну. Розроблені для цього методи отримали назву методів частотного маскування. Для їх реалізації маються, наприклад, наступні технічні рішення:

- використання попередньо спотворюючого та відновлюючого фільтрів;
- використання випадкового та псевдо випадкового збурюючого сигнала (ЗС) малої амплітуди.

Методи частотного маскування, що засновані на використанні ЗС, можуть давати значні зменшення надлишковості. Роблячи випадкову помилку квантування, можна більш ефективно використовувати просторову та часову фільтрацію, що проводяться в зоровому апараті. Як правило, частотне маскування використовується тільки при роздільному кодуванні телевізійного сигнала.

Спільно з кодованим сигналом в кодуючий пристрій вводиться ЗС малої амплітуди (розмахом до величини одного кроку квантування).

Можливі два варіанти режиму роботи:

ЗС вводиться на стороні, що передає і вираховується на приймаючій;

ЗС вводиться на передавальній стороні і не обчислюється на приймаючій.

В останньому випадку потужність флуктуаційної завади в відновленому сигналі подвоюється. Вплив ЗС на покращення суб'єктивної якості вихідного зображення можна пояснити наступним чином (рис. 1). Квантуюча характеристика АЦП представлена на рис. 1 *а*. Звичайно використання ЗС пов'язане з використанням незмінної в часі рівномірної шкали квантування. При цьому ЗС вибираються постійної амплітуди, рівній кроку квантування і незмінної в межах динамічного діапазону вхідного сигналу. Якщо на вхід АЦП надходить телевізійний сигнал без ЗС (суцільна лінія на рис. 1 *а*), то моменти перевищення порогів квантування ($A_{-2}, A_{-1}, A_1, A_2$) фіксуються і вихідний сигнал (рис. 1 *б*) буде ступінчатим сигналом. Якщо число рівнів квантування зменшено, то суб'єктивна якість такого зображення буде низькою, оскільки стрибки сигналу будуть проявлятися в вигляді різких переходів хибних контурів (пунктирна лінія на рис. 1 *б*).

Дія ЗС, що додається до квантованого сигналу, полягає в тому, щоб сумарний рівень сигналу з найбільшою швидкістю перевищував би сусідні пороги квантування. При цьому в вхідному сигналі будуть спостерігатися псевдо випадкові переходи розмахом на крок квантування (рис. 1 *в*). Спостерігач, розглядаючи відновлене зображення, в силу особливостей зорової системи, діючої подібно ФНЧ, інтегрує високочастотні складові, створюючи більш природне сприйняття грубоквантованого зображення (пунктирна лінія на рис. 1 *в*). порівнюючи суб'єктивне сприйняття (рис. 1 *б, в*), можна помітити суттєву різницю цих відновлених сигналах. Можна припустити, що квантування сигналів з ЗС дає можливість

відновить частину інформації, втраченої при грубому квантуванні. Використання одновимірних ЗС дає можливість зменшити помітність хибних контурів приблизно в два рази, а двовимірних – в шість разів.

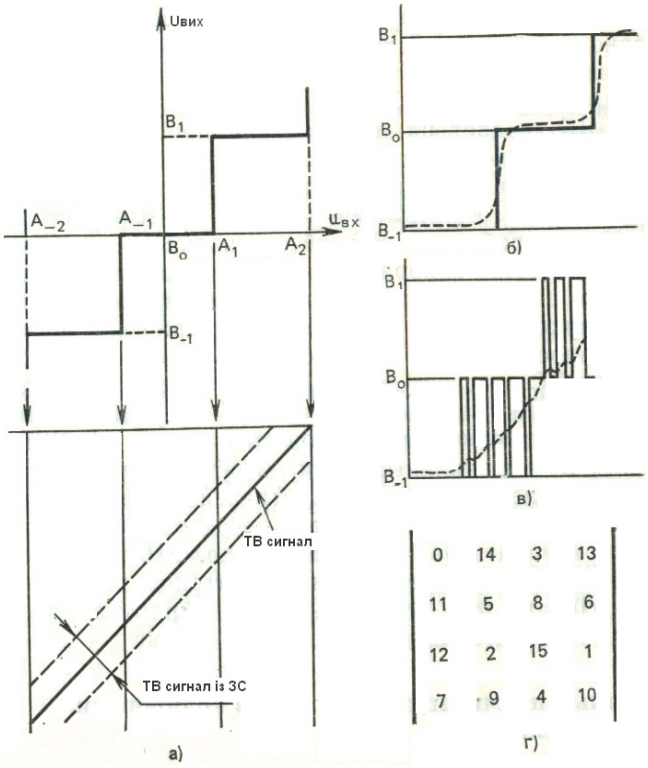



Рис. 1. Використання збурюючого сигналу.

Частіше за все використовуються випадкові та псевдо випадкові ЗС. При використанні випадкових ЗС накладаються вимоги на його статистичні властивості, а при використанні псевдо випадкових ЗС звертаються до його синтезу. Під час синтезу псевдовипадкових ЗС весь діапазон амплітуд між сусідніми рівнями квантування розбивають на рівні проміжки. Амплітуди ЗС, кратні величині цих проміжків динамічного діапазону, розміщують в такому порядку, щоб досягти максимальної швидкості переключення рівнів квантування в АЦП. При цьому повинні враховуватися характеристики ймовірності квантованого сигналу. В деяких випадках вимагають, щоб середня амплітуда такого сигналу дорівнювала нулю чи не перевищувала заданої величини. Це пов’язано з тим, що при порушенні цієї умови можливе виникнення мерехтіння, наприклад, між ділянками зображення чи кадрами з різною яскравістю.

При відніманні ЗС в декодуючому пристрої повинні усуватися всі ефекти, пов’язані з введеням ЗС на вході код ера ТВ сигналу. В цьому відношенні псевдо випадковий ЗС має переваги над випадковим ЗС, так як останній, як правило, не корельований в сусідніх кадрах, а псевдо випадковий ЗС може синхронно генеруватися в кодері та декодері ТВ сигналу.

Основним напрямком розвитку техніки цифрового телебачення є пошук і дослідження ефективних методів зменшення інформаційної надлишковості телевізійного сигналу і. як наслідок, зменшення вимог до пропускної здатності цифрового каналу зв’язку. При цьому кодек повинен забезпечити задану якість передачі телевізійного сигналу [1].

На етапі, коли система цифрового телебачення ТБ уже реалізована, основним засобом оцінки якості є суб’єктивні експертизи і телевізійні вимірювання. При цьому на стадії макетування в ряду випадків можна експериментально обрати суб’єктивно оптимальні параметри.

На стадії проектування і розробки систем і приладів цифрового телебачення для аналітичного чи чисельного розв’язання задачі оптимального синтезу необхідний критерій якості. Критерій якості системи цифрового телебачення повинен відповідати наступним

вимогам: виражатися числом; бути пропорційним суб'єктивній оцінці якості телевізійного зображення на виході тракту цифрового телебачення; враховувати властивості телевізійного сигналу, що передається по тракту цифрового телебачення.

Традиційні критерії якості,що використовуються при статичному оптимальному синтезі радіосистем, не задовольняють поставленим вимогам. В повній мірі їм також не задовольняють використовувані телевізійні інтегральні критерії якості.

Розглянемо питання побудови такого критерію якості каналу яскравості тракту цифрового телебачення.

Нехай x(t) та y(t) – сигнали яскравості на вході і на виході тракту цифрового телебачення. Припустимо, що телевізійні сигнали x(t) та y(t) обмежені по спектру частотою frp.

Вводимо міру спотворення сигналу яскравості в тракті цифрового телебачення:

$$d_x = \lim_{\tau\to\infty}\frac{1}{2\tau}\int_{-\tau}^{\tau}\{[h_k(x)h_p(x)(x-y)]*h_r(t)\}^2 dt \qquad (1)$$

Де $h_r(t)$ – перетворена по Фур'є вагова функція видимості завад по частоті; $h_p(x)$ – вагова функція видимості завад по рівню сигналу; $h_k(x)$ – вагова функція видимості завад по структурі сигналу, що в загальному випадку залежить як від положення даної точки в рядку кадру так і від приростів сигналу впродовж рядка, між рядками і між кадрами; * – знак згортки.

Можна ввести міру спотворення яскравості в тракті цифрового телебачення також у вигляді

$$d_y = \lim_{\tau\to\infty}\frac{1}{2\tau}\int_{-\tau}^{\tau}\{[h_k(y)h_p(y)(x-y)]*h_r(t)\}^2 dt \qquad (2)$$

Формула (2) більш зручна при апаратурній реалізації, а формулу (1) можна використовувати тільки при аналітичних дослідженнях і моделюванні на ЕОМ. Так як спотворення в тракті цифрового телебачення мають малу величину, практично $d_x = d_y = d$.

Аналогічно може розв'язуватись задача побудови критерію оптимальності для каналу колірності, а також, з урахуванням відповідних ваг завад в кожному з каналів – критерію для всієї системи цифрового телебачення [2].

Для оцінки ефективності зменшення надлишковості в кодері телевізійного сигналу, крім швидкості спотворення можна використовувати також широко розповсюджені в досліджуваннях систем цифрового телебачення показники: ε- ентропія и пов'язана з нею швидкість створення інформації. При оптимізації системи цифрового телебачення необхідно враховувати, що при правильній побудові кодера телевізійного сигналу зменшення надлишковості може не супроводжуватися підвищенням вимог до достовірності передачі по цифровому каналу зв'язку.

## Висновки

Розглянуті методи оптимізації кодування цифрового телевізійного сигналу є достатньо ефективними для їх використання у розробці сучасних технічних засобів передавання та відображення інформації.

## Список літератури

1. *Fukuniki T.* Optimisation of DPCM for TV signals with consideration of visual property.- IEEE Trans. Commun. 1974, COM-22, N 6. P.821-826.

2. *Брауде-Золотарев Ю.М., Виленчик Л.С., Чуйко Э.А.* Некоторые особенности оптимального цифрового кодирования ТВ сигнала.- В кн.: Повышение надежности и эффективности технических средств телевидения и радиовещания(тезисы докладов). Минск, 1977. С. 51-52.

УДК 621.372.542

*Ю.В. Литвиненко, Ю.В. Погрібна*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ЗАСТОСУВАННЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ НАДЛИШКОВОСТІ ВІДЕОІНФОРМАЦІЇ

*В статті піднімається проблема застосування цифрової обробки для зменшення надлишковості цифрової відеоінформації. Наголошується, що зменшення надлишковості при передачі зображень – дуже важлива задача для збереження інформації в цифровому вигляді і для зниження рівня економічнихтрат.*

Інтенсивний розвиток цифрових методів вплинув на всі гілки техніки передачі і збереження інформації в силу притаманним цифровим системам переваг в завадозахищеності, можливості виправлення помилок, гнучкості при комутації повідомлень, постійного зниження вартості й підвищення надійності. Одночасно з запровадженням цифрової техніки розширялось використання зображень в різних областях науки та техніки, наприклад в медицині, експериментальній фізиці, безконтактній дефектоскопії, дослідженні природних ресурсів. Така паралельність розвитку цифрової техніки і розширення області застосування зображень привела до очевидного результату, а саме до інтенсивних досліджень в сфері передачі і запису зображень цифровими методами.

Типове зображення містить багато надлишкової інформації. Ця надлишковість приводить до економічних втрат. Ширина смуги частот, необхідна для передачі зображення в цифровій формі, залежить від числа відліків зображення, розрядності відліків, часу, що відводиться на передачу, та від потужності передатчика. З розширенням смуги збільшується необхідна потужність передатчика та затрати. Гроші та енергія не є проблемою, але електромагнітний спектр доволі завантажений. Тому зменшення надлишковості при передачі зображень – дуже важлива задача. Настільки ж важлива вона і для збереження інформації в цифровому вигляді.

Надлишковість відеоінформації може бути описана функцією кореляції між відліками зображень; вона проявляється в високій степені взаємної статистичної прогнозованості близько лежачих відліків, взятих із зображення. Кінцевою ціллю операції стиснення відеоінформації є усунення цієї статистичної прогнозованості (тобто, необхідно в максимально можливому степені зменшити корельованість відліків). На блок-схемі рис. 1 показані основні операції, що виконуються системою стиснення відеоінформації. Спочатку виконуються операції по максимальному зменшенню корельованості відліків зображення. Потім відліки повинні бути відповідним чином квантовані. Квантовані відліки кодуються в форму, прийнятну для передачі (при цьому, звичайно, може бути забезпечена можливість знаходження чи виправлення помилок.

Квантування та кодування виконуються з врахуванням загальних правил, не залежних від особливостей схеми декореляції, вибраної для першого етапу обробки

Тому системи стиснення відеоінформації різняться видом схеми, що виконує операції, які відносяться до першого етапу.




Рис. 1. Блок-схема системи зменшення надлишковості відеоінформації.

При розробці принципів реалізації першого блоку схеми рис. 1 слід враховувати ряд суджень. Розглянемо спочатку статистичні властивості зображень. Якщо відліки зображення створюють сітку точок розміром N×N і кожен відлік представлений P – розрядним

двійковим числом, то при запису та передачі зображення за допомогою звичайної імпульсно-кодової модуляції (ІКМ) потрібно $N^2P$ двійкових розрядів. Однак, як було відмічено, типове зображення має високу надлишковість. Один із способів, що дозволяє виміряти цю надлишковість та порівняти її з номінальним числом $N^2P$ розрядів, полягає в побудові гістограми яскравості зображення та обчисленні відповідної ентропії. За допомогою P-розрядних чисел можна описати квантування по $2^P$ рівням. Для цього слід проаналізувати всі $N^2$ відліків та підрахувати, скільки разів зустрічається кожен рівень квантування.

Потім слід побудувати гістограму яскравості зображення, тобто для кожного рівня квантування зазначити число його появ у зображенні. Розділивши ці значення на загальне число точок $N^2$ , можна отримати апроксимацію щільності ймовірності процесу, породжую чого зображення. Якщо позначити нормовані частоти через $p_i$ ( i = 1, 2, ... , $2^P$), то ентропія за визначенням виражається сумою

$$h = -\sum_{i=1}^{2^P} p_i \log_2 \tag{1}$$

і дорівнює середній інформації (виміряній числом біт, які припадають на елемент зображення), що міститься в кожному елементі зображення. Аналіз зображень показав, що типове значення h набагато менше числа розрядів P, необхідного для стандартного представлення за допомогою ІКМ. Ентропія має величину порядку 1 біт/точку [1]. Це означає, що розрядність масиву, який описує зображення, можна (хоча б теоретично) зменшити без втрат інформації в середньому до 1 біт/точку.

Ентропія служить мірою статистичної надлишковості, але не дає відомостей про її походження. Джерелом надлишковості, як показує спостерігачу його зір, виступає висока степінь однорідності зображення на малих ділянках. Цю просторову надлишковість можна визначити за допомогою коваріаційної матриці зображення. Спочатку лексикотрафічно перетворюють матрицю з N×N відліків зображення в $N^2$ – компонентний вектор (тобто першого рядна (чи стовпчика) матриці g( j, k ) стають компонентами вектора з номерами від 1 до N, елементи другого рядка (стовпчика) – компонентами з номерами від N+1 до 2 N и т.д.). потім обчислюють коваріаційну матрицю зображення

$$[C_g] = E\{(g - E(g))(g - E(g))^T\} \tag{2}$$

де E – середнє значення по ансамблю, а g - вектор, побудований з відліків зображення. На практиці рідко виявляється можливим проводити по ансамблю і коваріаційну матрицю отримують за допомогою оцінки просторової кореляції [21].

Коваріаційні структури, такі, як матриця $[C_g]$, не мають взаємно-однозначного зв'язку з вихідним зображенням. Багато неоднакових зображень можуть виявитися доволі схожими в коваріаційному (або спектральному) сенсі. Отже, маємо підстави для заміни складної матричної структури типу $[C_g]$ більш постою.

При стисненні відеоінформації крім статистичних властивостей зображення доволі важливо враховувати і особливості отримувача зображень. Зір людини володіє обмеженими можливостями і характеризується деякими відомими (частково) вирізняючими особливостями. Використання конкретних особливостей зору для зменшення надлишковості зображень називається психофізичною обробкою.

В якості методу стиснення відеоінформації в області просторових координат, що виконується в першому блоці схеми рис. 2, найбільш широко застосовується диференціальна імпульсно-кодова модуляція (ДІКМ). За своєю структурою схеми ДІКМ співпадають зі схемами кодування методом лінійного передбачення (КЛП), що застосовується при стисненні смуги мовних сигналів, і тому схеми ДІКМ зображень інколи називають схемами стиснення методом передбачення. Блок-схема ДІКМ наведена на рис. 2. В цьому методі

використовується статистичний взаємозв'язок яскравості окремих точок зображення і для кожної точки формується оцінка яскравості у вигляді лінійної комбінації яскравості попередніх точок. Під попередніми точками мають на увазі точки, що розташовані перед точкою, що розглядається при розгортці зображення зверху вниз і зліва направо (як в телебаченні), завдяки чому складається цілком визначений порядок слідування точок зображення. Подібна схема, звичайно, буде застосована і тоді, коли зображення уже «розгорнуте» методом сканування. За тим обчислюється і кантується різниця між фактичним значенням яскравості і її оцінкою. Квантована різниця підлягає кодуванню і передається по каналу. На приймальному кінці символи декодуються,а інформація відтворюється за допомогою схеми лінійного передбачення n-го порядку, в якій формуються оцінки яскравості, які додаються до різниць, отриманих по каналу.

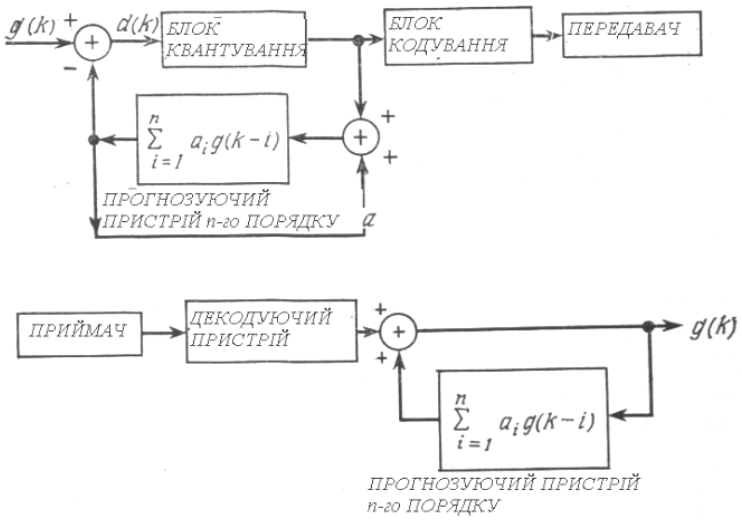



Рис. 2. Блок-схема системи стиснення методом ДІКМ с прогнозуючим пристроєм n-го порядку.

Прогнозуючі схеми, зображені на рис. 2., називаються зворотними прогнозуючими схемами, оскільки квантування сигналу відбувається всередині петлі зворотного зв'язку, а при відновленні сигналу передбачене значення подається за схемою назад. Можна спроектувати схеми ДІКМ, в яких передбачені значення сигналу подаються вперед, а також створити схеми ДІКМ, де блок квантування розташований поза петлею зворотного зв'язку. Однак такі системи дають відновлене зображення з більшими помилками. Схема з передбаченням назад необхідна в приймачі тому, що символи поступають послідовно. При використанні в передавачі аналогічної прогнозуючої схеми назад у випадку відсутності помилок, пов'язаних з квантуванням, можна було б відновити зображення з абсолютною точністю. Якщо схему квантування включити в петлю прогнозуючої схеми передавача, то і в приймачі,і в передавачі передбачення буде здійснюватися на основі однакових квантованих відліків, що дозволить зменшити помилки відновлення.

Оскільки ідея ДІКМ достатньо проста, то, як випливає із схем рис. 2., характеристики системи зменшення надлишковості зображень методом ДІКМ визначаються порядком прогнозуючого пристрою n, значеннями коефіцієнтів прогнозування $a_i$, числом рівнів квантування і їх розташуванням.

Порядок прогнозуючого пристрою залежить від статистичних характеристик зображення.

Коефіцієнти прогнозування $a_i$ можна визначити за допомогою аналізу середніх квадратичних похибок. Нехай *g(k)*- відліки в рядку згортки, а $\hat{g}(k)$ - прогнозовані значення цих відліків. Необхідно, щоб середня квадратична похибка була мінімальна, тобто треба знайти

$$\min e = E\{g(k) - \sum_{i=1}^{n} a_i g(k-i)\} \ . \tag{3}$$

Якщо процес *g(k)* стаціонарний, то розв'язок має вигляд [25]

$$\sum_{i=1}^{n} r(j-i)a_i = r(j), j = 1,2,...,n. \tag{4}$$

де

$$r(j-i) = E[g(k-j)g(k-i)]. \tag{5}$$

зазвичай називається автокореляційною функцією процесу *g*. Коефіцієнти $a_i$ отримуються розв'язком системи рівнянь (4).

Оптимальні значення коефіцієнтів прогнозування залежать від взаємозв'язків точок зображення, що описуються авто кореляційною функцією. З визначення (2) видно,що у випадку стаціонарних даних автокореляційна функція відрізняється від вищерозглянутої функції на постійну величину. При нестаціонарних даних функція *r* в рівнянні (5) залежить від просторових змінних і оптимальні коефіцієнти прогнозування повинні змінюватися в залежності від просторових координат. Вибір числа рівнів квантування і розташування порогів квантування є задачею частково кількісною і частково якісною. Розташування порогів квантування можна знайти кількісними відліками [3].

Схеми стиснення методом ДІКМ з двовимірним прогнозуванням базуються на тих же принципах, що і при одновимірному. Оскільки для зображень характерна наявність двовимірних статистичних взаємозв'язків, можна сподіватися, що двовимірне прогнозування дасть кращі результати по стисненню зображень, так як декореляція зображень за допомогою операцій прогнозування і віднімання буде здійснюватися за двома координатами. Дійсно, пристрої з просторовим прогнозуванням дають більш якісні зображення [2].

Для зображень, що складаються з послідовних кадрів, наприклад телевізійних, ідеї прогнозування і віднімання, пов'язані з ДІКМ, можна розповсюдити на часову область. В подібних зображеннях яскравість багатьох точок від кадру до кадру не змінюється або змінюється повільно.

## Висновки

Таким чином, можна побудувати систему стиснення методом ДІКМ, в якій яскравість чергової точки прогнозується на основі інших яскравостей двовимірного набору точок даного кадру і відповідних точок попередніх кадрів. На практиці порядок часового прогнозування не може бути високим, так як для кожного часового доданку необхідно мати запам'ятовуючий пристрій, де зберігався б увесь кадр. Моделювання з прогнозуючим пристроєм третього порядку, в якому для передбачення використовувались точки, розташовані в даному і попередньому кадрах зліва від розглянутої точки і вверх від неї, показало, що можна отримати дуже гарні зображення при середній розрядності 1біт/точка [4].

## Список літератури


1. *Habibi A., Robinson G.,* A Survey of Digital Picture Coding, Computer, 7, 22-35 (1974).
2. *Habibi A*., Comparison of nth Order DPCM Encoder with Linear Transformations and Block Quantization Techniques, IEEE Trans. Commun. Technol., 19, 948-956 (1971).
3. *Max T.,* Quantizing for Minimum Distortion, IRE Trans. Inform. Theory, 16, 7-12 (1970).
4. *Pratt W. K.,* Digital Image Processing, Wiley, New York (1977).

УДК 621.317.39 (075.8)

*Д.П. Орнатский, к.т.н., В.В. Довгань, аспирант*
*(Национальний авиационный университет, Украина),*
*Д.В. Никитенко, нач. отдела (ДП "Укрметртестстандарт", Украина)*

# МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АППАРАТУРЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

*В статье поднимается проблема построения аппаратуры для диагностирования подшипников качения. Рассмотрены достоинства и недостатки различных методов контроля подшипников, а также технические средства, которые реализуют эти методы диагностики.*

Вибрационная диагностика подшипников качения является одной из наиболее важных практических функций службы диагностики. По этой причине правильный выбор аппаратуры для этой цели во многом определяет эффективность и значимость диагностической службы предприятия. В данном обзоре мы кратко рассмотрим достоинства и недостатки различных методов контроля подшипников качения, а также технические средства, реализующие эти методы диагностики.

Задача диагностирования подшипниковых частот является сложным процессом, это обусловлено тем, что вибрационные сигналы очень слабые по уровню. Рядом с ними находятся более мощные основные гармоники вибрации. Поэтому выделение этих частот является сложной технической задачей.

Для решения данной задачи принято использовать два основных подхода стохастический и детерминированный. Недостатком стохастического метода является то, что для получения необходимого соотношения сигнал/шум, не обходимо устанавливать датчик непосредственно на подшипниках, но во многих случаях практики это не возможно. По этому целесообразно использовать детерминированный подход, в котором возможно использование фильтров. Для повышения соотношения сигнал/шум используют
*N* - канальные фильтры.

Приведем основные методы диагностики подшипников качения.

Известно устройство для контроля подшипников, содержащее преобразователь колебаний, полосовой фильтр, синхронный гребенчатый фильтр, заграждающий синхронный гребенчатый фильтр, преобразователь углового положения вала, синхронизатор, индикатор. Недостатком устройства является низкая достоверность определения дефекта вследствие недостаточно четкого выделения спектра сигнала исследуемого узла.

Следующий способ диагностики дефектов подшипников качения, заключающийся в том, что при вращении их регистрируют спектральный состав вибраций с помощью узкополосного фильтра. Однако этот способ не позволяет по величине амплитуд спектральных составляющих с необходимой точностью определить вид и величину дефекта [1].

Следующий известный метод состоит в том, что определяют вибрацию диагностируемого подшипника методом сканирования с выделением из всего сканированного спектра экспресс-параметра подшипника, благодаря которому определяют его качество. Недостатком данного способа является способность определять только текущее состояние подшипника без возможности анализа развития дефекта, невозможность идентификации дефекта за видом [2].

Схемные реализации *N* – канальных фильтров обладают преимуществом: характеристики фильтра легко можно регулировать электронным способом. Это достигается путем регулирования фазы, частоты и содержания гармоник у автогенераторов. Применяя для регулирования этих параметров цифровые схемы, можно получить точность и простоту регулировки. Эти преимущества наряду с последними успехами интегральных схем обусловили возобновления интереса к фильтрам с использованием изменяющихся во времени элементов, но уже выполняемым в интегральной форме.

$N$ – канальный фильтр является обобщенной схемной конфигурацией, показанной на рис. 1, которая состоит из $N$ параллельных каналов каждый из которых содержит инвариантный во времени фильтр с входными и выходными модуляторами. С помощью простых многоканальных цепей можно получить высокоизбирательный полосовой фильтр или многополосный фильтр, для реализации которого нормальными средствами потребовались бы высококачественные линии задержки.

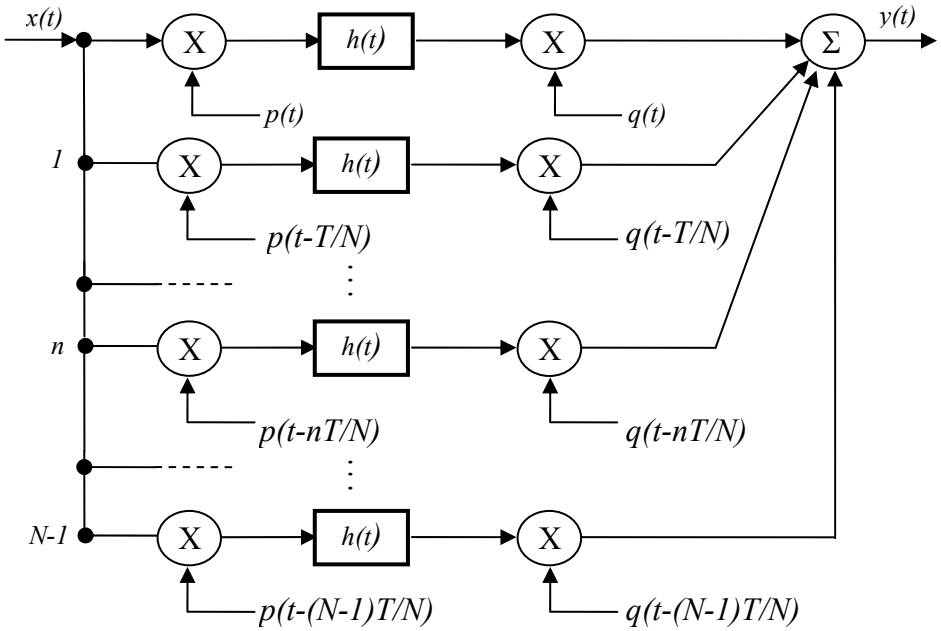



Рис. 1. Блок-схема $N$ - канального фильтра

Рассмотрение свойств $N$ – канального фильтра начнем с анализа изменяющейся во времени цепи, представляющей один канал $N$ – канальной схемной конфигурации.

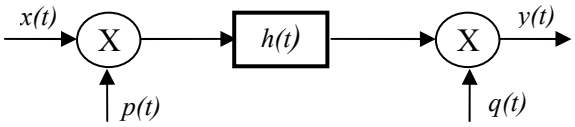



Рис. 2. Одноканальная изменяющаяся во времени схема с входным выходным умножителями

Если предположить, что цепь, осуществляющая линейную операцию, имеет нулевой выходной сигнал при нулевом входном сигнале то можно записать общее соотношение между выходным сигналом *y(t)* и входным сигналом *x(t)* в виде

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \omega(t, t_1) x(t_1) dt_1, \tag{1}$$

где $\omega(t, t_1)$ – импульсная характеристика цепи.

В данном случае, как это показано на рисунке 2, мы рассматриваем операцию, состоящую из умножения, некоторой инвариантной во времени операции и еще одного умножения. Следовательно, импульсная характеристика канала равна

$$\omega(t, \tau) = p(\tau) h(t - \tau) q(t) \tag{2}$$

В приложениях, которые будут здесь рассмотрены, модулирующие функции $p(t)$ и $q(t)$ будут периодическими с периодом $T$. Эти функции можно представить в виде рядов Фурье:

$$p(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} P_m e^{j(2\pi m t / T)} = p(t + T) \ ,$$

$$q(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} Q_l e^{j(2\pi l t / T)} = q(t + T) \, . \tag{3}$$

Некоторые из важных особенностей изменяющейся во времени цепи этого типа можно найти, исследуя ее реакцию на экспоненциальный входной сигнал вида $e^{st}$, где $s$ – произвольная комплексная частота. Для $x(t) = e^{st}$, использовав замену переменной $\sigma = t - \tau$, получим

$$y(\tau) = \int_{-\infty}^{t} p(\tau)h(t-\tau)q(t)e^{st}dt = \sum_{l}\sum_{m} Q_l P_m e^{j[2\pi(l+m)t/T]} e^{st} \int_{0}^{\infty} h(\sigma)e^{-s\sigma - j(2\pi m\sigma/T)}d\sigma = \tag{4}$$

$$= [\sum_{l}\sum_{m} P_m Q_l H(s + j\frac{2\pi m}{T}) e^{j[2\pi(l+m)t/T])}]e^{st},$$

где *H(s)* – преобразование Лапласа для функции *h(t)*, $P_m$ и $Q_l$ - коэффициенты Фурье.

Результирующая передаточная функция имеет форму, которая позволяет осуществить единый подход к реализации фильтров многих типов в отличии от методов, которые используются только в случае элементов с постоянными параметрами.

Если высшая гармоническая составляющая в модулирующих функциях имеет частоту меньше *N/2T*, то *N* – канальный фильтр ведет себя по отношению к внешним зажимам как инвариантный во времени. Наиболее распространенное применение этот результат получил при преобразовании фильтра нижних частот в полосовой с помощью модулирующих функций одной частоты.

Одним из полезных приложений свойства периодичности характеристики *N* – канального фильтра является выделение периодических сигналов на фоне непериодических помех. Если канальные цепи являются фильтрами нижних частот, имеющими малую по сравнению с *1/2T* полосу пропускания, то частотная характеристика *N* – канального фильтра в целом представляет собой последовательность равномерно распределенных по частоте частотных полос пропускания („гребенку"), которая вносит лишь небольшое искажение сигналов с периодом *T*, но значительно снижает мощность помехи .

В одной из реализаций *N* – канального заграждающего гребенчатого фильтра на выходе каждого канала стоят дискретизирующие ключи, замыкающиеся на короткие интервалы времени, и канальные цепи, представляют собой однополюсные *RC* – фильтры, но верхних частот. Требуемая характеристика заграждения критична по отношению к времени задержки $\tau$, на которое при данном конкретном методе реализации задерживается срабатывание выходных ключей по отношению к входным [3].

Выше описанные реализации характерны низким быстродействием. Поэтому целесообразно использовать итерационные интегрирующие преобразователи, которые обеспечивают повышения быстродействия фильтров примерно в 10 тысяч раз по сравнению с обычными.

Для повышения эффективности выделения ранних диагностических признаков основная гармоника должна быть подавлена. Эта задача решается с помощью следящего режекторного фильтра СРФ, который, обеспечивает сжатие спектра всех высокочастотных составляющих в полосу $0 - f_0$. В качестве СРФ предложено использовать *N* – канальный фильтр, импульсная характеристика которого задается выражением:

$$h_1(t) = c(t) \cdot h(t), \tag{5}$$

действительным только для полосы частот $|f| \le {}^{N}\!/_{2T}$ .

Где $c(t)$ – периодическая функция времени с периодом $T$, $h(t)$ – импульсная характеристика канальной цепи, находящейся в каждом из $N$ каналов. Основным преимуществом является возможность точной электронной настройки частотной характеристики фильтра. Известные реализации заграждающих гребенчатых *N* – канальных фильтров, использующие в качестве канальных однополюсные $RC$ – фильтры верхних частот, имеют, существенный недостаток, связанный с необходимостью реализации точного времени «запаздывания» $\tau$ в канальных фильтрах, которое требуется для получения необходимой характеристики заграждения. При этом даже небольшие изменения $\tau$

приводят к полному исчезновению провалов частотной характеристики.

Использование «лестничных» структур на основе коммутируемых конденсаторов приводит к затягиванию переходного процесса. От указанных недостатков свободен предлагаемый следящий режекторный фильтр, блок-схема которого представлена на рис. 3.

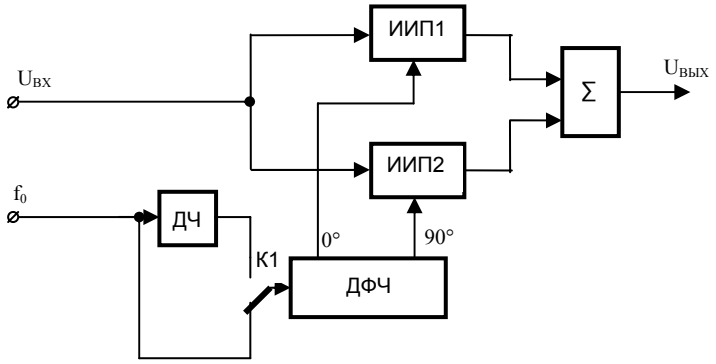



Рис. 3. Блок-схема следящего режекторного фильтра

Основу фильтра составляют два итерационных интегрирующих преобразователя ИИП1, ИИП2, синхронизируемых прямоугольными модулирующими функциями, сдвинутыми друг относительно друга на четверть периода.

Преимуществом использования итерационных интегрирующих преобразователей в качестве канальных фильтров является их высокое быстродействие по сравнению с аналоговыми активными фильтрами. Управляющие сигналы для итерационных преобразователей формируются с помощью делителя-фазорасщепителя ДФЧ из сигнала оборотной частоты $f_0$, непосредственно или после дальнейшего прохождения его через делитель частоты на три ДЧ и коммутатор К1. Делитель-фазорасщепитель ДФЧ делит частоту входного сигнала на четыре и формирует прямоугольные выходные сигналы, сдвинутые на 90°. Частотная характеристика такого фильтра будет иметь глубокие провалы АЧХ на частотах, кратных $f_0$. Глубина этих провалов практически будет определяться фазовым шумом управляющих сигналов и может достигать значений 90-100 дБ.

Таким образом, на выходе режекторного фильтра образуется сигнал, спектр которого будет содержать информацию о всех высокочастотных составляющих исходного вибросигнала. Диагностическим параметром в данном случае будет спектр мощности выходного сигнала режекторного фильтра [4].

**Вывод**

Известные реализации заграждающих гребенчатых $N$ – канальных фильтров, использующие в качестве канальных однополюсные $RC$ – фильтры верхних частот имеют существенный недостаток, связанный с необходимостью реализации точного времени «запаздывания» $\tau$ в канальных фильтрах, требующегося для получения необходимой характеристики заграждения. При этом даже небольшие изменения $\tau$ приводят к полному исчезновению провалов частотной характеристики.

В связи с этим предложен следящий режекторный фильтр, который свободен от указанных выше недостатков.

**Список литературы**

1. *Шестериков К.А., Гречинский Д.А.* Устройство для вибродиагностики механизмов. Авторское свидетельство № 1142747, кл. G 01 M 13/02. Бюл. №8, 1985.

2. *Тартаковський Е.Д., Бабанін О.Б.* Спосіб вібраційної діагностики підшипників. Патент на винахід №84322, кл. G 01 M 13/00. Бюл. №19, 2008.

3. *Темеша Г., Митра С.* Современная теория фильтров и их проектирование. – М.: Издательство “МИР” 1977. - 560 с.

4. *Квасников В.П., Орнатский Д.П.* Способ измерения параметров вибраций газотурбинных установок. ВІСНИК НАУ, 2007.

УДК 681.518.3

*Д.П. Орнатский, к.т.н.*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ АНАЛОГОВЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

*Рассматриваются особенности современного этапа интеллектуализации аналоговых интерфейсов информационно-измерительных систем. Показаны преимущества предложенного способа построения таких интерфейсов и приводятся результаты математического и физического моделирования, подтверждающие его более высокие технико-экономические показатели.*

Для современных аналоговых интерфейсов информационно-измерительных систем характерны следующие средства связи[1]:

- двухпроводные линии связи, по которым передаются как измерительные сигналы, так и сигналы инициализации резидентной части аналоговых интерфейсов, в этом случае наибольшее распространение получил токовый унифицированный сигнал в диапазоне 4-20 мА;
- трехпроводные линии связи, в которых ток питания резидентной части и выходной ток измерительного преобразователя передаются по отдельным проводам;
- четырехпроводные линии связи, в которых контур питания и контур выходного сигнала изолированы друг от друга, причем это изолирование реализуется в передающей части аналогового интерфейса;
- шины для подключения к ПК с помощью интерфейсов RS 232, RS 485.

Для первых двух средств связи реализация элементов аналогового интерфейса существенно упрощается благодаря тому, что ряд универсальных приемо-передающих измерительных преобразователей для унифицированных измерительных сигналов постоянного тока выпускаются фирмой Burr-Brown в виде интегральных микросхем, обеспечивающих им широкое применение в автоматизированных системах управления производственными процессами.

Четырехпроводные линии связи используются как правило для измерительных преобразователей общего применения с потенциальными выходными сигналами (0-5В, 0-10В).

В средствах передачи цифровой информации в связи с устойчивой тенденцией интеллектуализации полевого оборудования можно отметить два направления:

- снабжение измерительных преобразователей встроенными цифровыми контроллерами для согласования с универсальными сетевыми интерфейсами;
- объединение технологий передачи аналоговой и цифровой информации по одной линии связи.

В первом случае для взаимодействия измерительных преобразователей и контроллеров/систем ввода-вывода наибольшее распространение получили такие протоколы как CAN, Profibus-PA, Foundation Fieldbus H1, Interbus, DeviceNet, LON, As-i.

Во втором случае обеспечивается возможность обмена цифровой информацией, используя стандартную сеть с HART-протоколом [2]. В этой сети цифровые сигналы передаются по той же линии связи, что и аналоговые. Для передачи цифровой информации HART-протокол использует принцип частотной модуляции: логическая единица соответствует одному полному периоду частоты 1200 Гц, а логический ноль – двум периодам синусоиды 2200 Гц. Цифровой и аналоговый сигналы передаются по одной паре проводов путем простого наложения HART на токовую петлю.

К недостаткам таких систем можно отнести:

- ограничение полосы аналоговых сигналов порядка 10 Гц в связи с необходимостью разделения с низкочастотным цифровым сигналом [3];
- топология сети – звезда.

От указанных недостатков свободен аналоговый интерфейс [4] на основе дифференциально-токовых структур, позволяющих формировать на передающем конце дифференциальные и синфазные сигналы для разного типа передаваемой информации, работающий со стандартными датчиками. Например, дифференциальные сигналы могут быть использованы для передачи аналоговой информации, а синфазные – цифровой. При этом они могут находиться в одной и той же полосе частот, расширенной за счет более эффективного их разделения на приемном конце измерительным усилителем с дифференциально-токовыми входами. Такой интерфейс может работать с обычными датчиками и с помощью универсальных интеллектуальных интерфейсных блоков обеспечить множество наиболее полезных свойств, предусмотренных стандартами IEEE 1451.2.

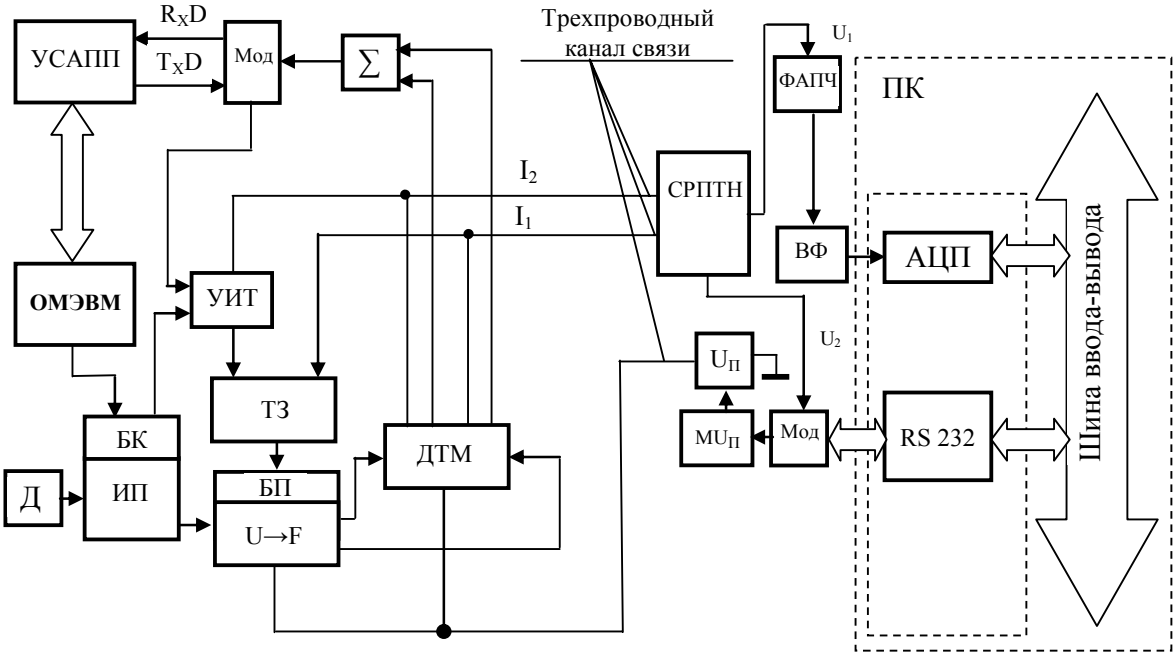



Рис.1.Структурная схема интеллектуального аналогового интерфейса для многоточечных информационно-измерительных систем.

На рис.1. представлена структурная схема предлагаемого интерфейса. В основе построения такого интерфейса лежит трехпроводный аналоговый интерфейс, предложенный в [5]. Его основными структурными элементами являются трехпроводный канал связи, на передающем конце которого для питания резидентной части используется токовое зеркало ТЗ, в одном из плеч которого включен управляемый источник тока УИТ. Он формирует входной ток токового зеркала. Выходной ток токового зеркала поступает в блок питания БП, обеспечивая питание всей резидентной части интерфейса. При этом цифровая часть передающей части аналогового интерфейса включает однокристальный микроконтроллер, выполненный по CMOS-технологии, например типа TS87C52X2 фирмы TEMIC, являющийся версией однокристальных микро-ЭВМ типа 80С51. Потребление этого контроллера не превышает 1,8 мА при тактовой частоте 1 МГц и напряжении питания 5 В. Это позволяет с помощью управляемого источника тока УИТ, управляемого микроконтроллером посредством блока коррекции БК, обеспечить «спящий» режим аналоговой секции передающей части интерфейса при включении питания, например, задержкой включения питания аналоговой секции передающей части интерфейса (на время инициализации микроконтроллера) и включения управляемого источника тока УИТ в режим малого тока (для питания только цифровой части). Это обеспечит обестачивание аналоговой секции передающей части

интерфейса до тех пор, пока не поступит команда от ведущего устройства – ПК или HART-коммуникатора. Таким образом может быть реализована шинная архитектура сети.

Информационный сигнал при этом создается с помощью дифференциально-токового модулятора ДТМ, соединенного своими выходами непосредственно с дифференциальными линиями канала связи. Синфазные токи формируются с помощью управляемого источника напряжения питания $U_П$, расположенного на передающем конце интерфейса, подключаемого к третьему (общему) проводу канала связи.

Разделение дифференциальных и синфазных сигналов на приемном конце осуществляется с помощью суммо-разностного преобразователя ток-напряжение СРПТН, при этом выходное напряжение СРПТН $U_1$ пропорционально разности токов $I_1$ и $I_2$, протекающих в дифференциальных линиях канала связи. Выходное напряжение СРПТН $U_2$ пропорционально сумме токов $I_1$ и $I_2$. Разность токов $I_1$ и $I_2$ формируется на передающем конце интерфейса пропорционально информационному аналоговому сигналу с помощью последовательной цепи преобразования выходного сигнала датчика Д, измерительного преобразователя ИП и частотного модулятора U→f, формирующего два противофазных треугольных напряжения, частота которых пропорциональна выходному сигналу датчика. Эти напряжения поступают на дифференциальные управляющие входы дифференциально-токового модулятора ДТМ, создающего токи $I_1$ и $I_2$ в канале связи. На приемном конце выходное напряжение $U_1$, формируемое с помощью СРПТН, пропорциональное разности токов $I_1$ и $I_2$, будет иметь треугольную форму и частоту, пропорциональную измеряемому параметру.

Напряжение $U_1$ поступает далее на широкополосную систему ФАПЧ, описанную в [6], обеспечивающую слежение частоты местного гетеродина за частотой входного сигнала. Это обеспечивает снижение порога помехоустойчивости, присущего обычным системам связи с частотной модуляцией, использующим, как правило, синусоидальную форму сигнала и равного 10-13 дБ. Использование в качестве местного гетеродина измерительного преобразователя напряжение-частота с импульсной обратной связью позволяет отказаться от традиционного ФНЧ на его входе, за счет чего быстродействие системы увеличивается приблизительно в 1000 раз.

Для восстановления формы измерительного сигнала выходной сигнал преобразователя напряжение-частота с импульсной обратной связью поступает на вход восстанавливающего фильтра ВФ [7], выполненного на основе итерационных интегрирующих преобразователей, что обеспечивает высокую точность и быстродействие восстановления исходного сигнала.

Цифровая информация передается по тому же каналу связи с помощью стандартных модемов «Мод» в соответствии со стандартом BELL 202 в полудуплексной форме, позволяющей управляющей системе получить от полевого устройства 2-4 цифровых сообщения в секунду. При этом аналоговые входные сигналы модема, расположенного на передающем конце интерфейса, формируются с помощью сумматора $\sum$, суммирующего напряжения, пропорциональные части токов $I_1$ и $I_2$, сбалансированные по дифференциальной составляющей, формируемые с помощью дифференциально-токового модулятора ДТМ. Выходной аналоговый сигнал модема передающей части поступает на управляющий вход управляемого источника тока УИТ, вызывая синфазные изменения части токов $I_1$ и $I_2$ с помощью токового зеркала ТЗ. Эти изменения выделяются на приемном конце с помощью суммо-разностного преобразователя ток-напряжение СРПТН, формирующего выходное напряжение $U_2$, пропорциональное сумме токов $I_1$ и $I_2$, поступающее на аналоговый вход модема приемной части интерфейса. Таким образом, передача цифровой информации от резидентной части к ПК осуществляется по цепи: однокристальная микро-ЭВМ (ОМЭВМ), универсальный синхронно-асинхронный приемопередатчик (УСАПП), модем передающей части (Мод), управляемый источник тока (УИТ), суммо-разностный преобразователь ток-напряжение (СРПТН), модем приемной части (Мод), интерфейс RS232C. Передача цифровой информации в обратном направлении происходит по цепи: интерфейс RS232C, модем приемной части (Мод), модулятор источника питающего напряжения ($MU_П$), источник

питающего напряжения ($U_П$), дифференциально-токовый модулятор (ДТМ), сумматор (∑), модем передающей части (Мод), универсальный синхронно-асинхронный приемопередатчик (УСАПП), однокристальная микро-ЭВМ (ОМЭВМ). Такая структура позволяет обеспечить полудуплексный режим обмена информацией между персональным компьютером и резидентной частью интеллектуального аналогового интерфейса. Передаваемая цифровая информация в интеллектуальных интерфейсах является, как правило, служебной, например – характеристики датчика, время осуществления ближайшей необходимой коррекции измерительного канала, результаты самодиагностики и т.п.

Физическое моделирование включало в себя исследование достоверности передачи различных модулирующих функций типа: прямоугольник, треугольник, синусоида, в условиях воздействия аддитивного белого шума в полосе пропускания канала. При этом частота несущей была равна 1 кГц, полоса качания частотно-модулированного сигнала – 800 Гц, соотношение сигнал/шум на входе ФАПЧ – 6 дБ. Погрешность нелинейности функции преобразования приемной части аналогового интерфейса – менее 0,05%.

**Выводы**

Таким образом, предлагаемый интеллектуальный аналоговый интерфейс имеет следующие преимущества:

- более высокая точность и помехозащищенность;
- использование одного и того же канала связи для передачи аналоговой и цифровой информации в одной и той же полосе частот;
- возможность использования топологии сети – шина;
- на порядок более широкая полоса полезного сигнала.
- возможность работы без модемов и частотной модуляции полезного сигнала (при ограниченных расстояниях) благодаря эффективному разделению синфазного и дифференциального сигналов в более широкой полосе частот с помощью дифференциально-токовых структур [8].

Было проведено физическое и математическое моделирование элементов описанного интерфейса, подтверждающее его высокие технико-экономические показатели.

**Список литературы**


1. *Уикзер Дж.* Соединяемость: интеллектуальные датчики или интеллектуальные интерфейсы. Датчики и Системы №10, 2002 г., стр. 50-54.
2. *Корнова Т.Л.* HART-протокол и другие коммуникационные технологии, применяемые в России. Датчики и Системы №6, 2004 г., стр. 41-48.
3. *Уолт Кестер, Билл Честнат, Грейсон Кинг.* Интеллектуальные датчики. АВТЭКС Санкт-Петербург. http://www.autexspb.da.ru.
4. *Квасников В.П., Орнатский Д.П.* Интеллектуальный аналоговый интерфейс для многоточечных информационно-измерительных систем. Перша міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси ІПРТК-2008», Збірка тез, Київ, НАУ, 2008.
5. Трипровідний аналоговий інтерфейс. МПК G06F13/00/ Бабак В.П., Орнатський Д.П. Патент № 74738 (UA) Опубл. 16.01.2006, Бюл. №1.
6. Аналоговий інтерфейс для сполучення первинних перетворювачів з мікро-ЕОМ, вимірювальний перетворювач і двотактний підсилювач потужності для використання у інтерфейсі. Орнатський Д.П. Патент № 68451 (UA) Опубл 16.08.2004, Бюл. №8
7. Відновлювальний фільтр. Орнатський Д.П. Куц Ю.В., Бороденко І.А., Борковська Л.О. Патент № 23151 (UA) від 10.05.2007.
8. *Орнатский Д.П., Виничук О.А., Нимченко Т.В.* Дифференциально-токовые структуры в аналоговых интерфейсах информационно-измерительных систем. Праці Міжнародної науково-практичної конференції «Обробка сигналів і негауссівських процесів», ЧДТУ, Тези доповідей. 2007 р., м. Черкаси.

УДК: 378.93

*А.В. Дзюбаненко, аспирант*
*(Национальный авиационный университ, Украина )*

# ОБЗОР МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ НА БАЗЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВИДЕОСИСТЕМ

*В статье раскрывается о выделении признаков двигающихся объектов, о моделях объекта, образа и статических методах распознавания. Приведены алгоритмы признаков двигающихся объектов для одномерного и двухмерного случая. Обосновано применение статических методов распознавания.*

## Введение

На сегодняшний день, в связи с интенсивным развитием интеллектуальных систем, появляется возможность решения многих задач путем создания прикладных систем интеллектуального анализа данных. Построение системы, которая при изначальном незнании конкретного смысла сенсорных данных, посредством анализа последовательно наблюдаемых зрительных картин производит формирование понятий и законов, обеспечивающих возможность достаточно полного предсказания дальнейшего хода изменения этих картин и организации на этой основе целенаправленного поведения.

В качестве простейшей моделей, определяющих распознавание движущихся объектов (выбор которых мало влияет на устройство системы), рассматриваются ситуации, подобные игре в бильярд, когда на столе находятся движущиеся шары, тормозящиеся под действием сил трения, отражающиеся от бортов и изменяющие направления и скорости своего движения при соударениях.

Формирование понятий и законов происходит посредством анализа ситуации - текущей последовательности картин, получаемых припостоянном наблюдении за происходящим.

## 1.Выделение признаков движущихся обьектов.

Выделение признаков и их кодирование - это специфическая операция, реализуемая на этапе обработки информации об объекте. Эта операция может реализовываться и на последующих этапах. По существу, выделение признаков включает в себя выделение определенных параметров модели объекта, и преобразование этих параметров в координаты вектора, описывающего этот объект (вектор описания образа).

Анализ текущих картин основывается на изначально заложенном в систему языке описания понятий и состоит в рекуррентном применения к картинам и другим объектам, получаемым в результате их обработки, набора операторов, выполняющих над объектами те или иные преобразования. Каждый оператор применим к объектам определенных типов и приводит к формированию объектов, вообще говоря, других типов [1]. Типом или понятием А называется класс объектов, задаваемый какой-либо характеристикой (свойством). Объекты этого класса называются представителями понятия А или объектами типа А. На множестве типов определена структура с отношениями: “тип -подтип”, причем оператор применимый к типу, применим и к подтипу, но не наоборот. Применение операторов к результатам работы других операторов, т.е. использование суперпозиции операторов, может приводить к построению сколь угодно сложных типов объектов. Примерами типов могут служить характеристики предметов или действий, размерности физических величин и пр. В системе изначально заложен ряд базовых типов, таких как [6]: элемент (объект, точка), множество (набор), ситуация (последовательность картин с заданным началом отсчета), текущая картина, точка картины, характеристики объектов: числовые переменные (координаты времени и пространства, интенсивность цвета и пр.), логические переменные.

В качестве примеров операторов можно привести следующие.

Преобразование областей: выделение границ, заполнение контура, натягивание выпуклой оболочки, гладкая интерполяция линий, объединение областей по заданной характеристике,

Измерения: расстояние, длина, площадь, направление, скорость, ускорение, координаты, среднее значение, максимум, минимум, число объектов.

### 1.1. Выделение признаков для одномерного случая (вектор описания, оба раза имеет одну координату)

На вход устройства поступает положительный сигнал x, имеющий какую-либо количественную характеристику (например, интенсивность звука или сила давления какого-либо рычага на датчик, или яркость световой вспышки).

Необходимо определить к какому классу A или B следует отнести сигнал x, если в класс A относим сигналы с маленькой характеристикой x, а в класс B относим сигналы с большой характеристикой x. Вектор описания Y(x).

Алгоритм распознавания в этом случае очень простой (рис. 1). Там же обозначены на оси Ox множества A и B.

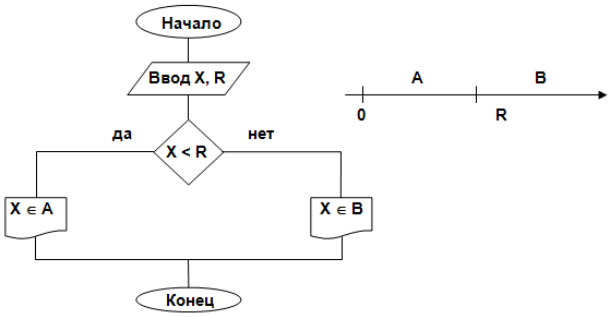



Рис. 1. Выделение признаков и классификация (одномерный случай)

### 1.2. Выделение признаков для двухмерного случая (вектор описания образа имеет две координаты)

На вход устройства поступает какой-либо сигнал X, имеющий длительность T и силу P. Необходимо определить к какому классу A или B следует отнести сигнал X, если в класс A относим сигналы с малой интенсивностью, а в класс B относим сигналы с большой интенсивностью, в этом случае вектор описания У(T,P).[2]

Сформулируем требования с участием ограничений по T и P -пусть это R1 и R2.

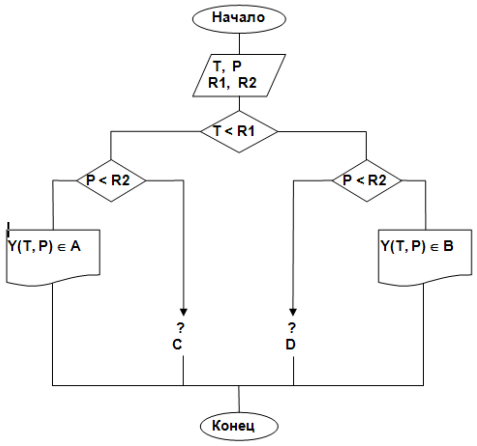
Класс A У(T,P) T<R1 и P<R2.

Класс B У(T,P) T>R1 и P>R2.

Алгоритм распознавания в этом случае приведен на рис. 2.

При реализации алгоритма образуются две области неопределенности C и D ; необходимо доопределить множества A и B.

Рис. 2. Выделение признаков и классификация (двухмерный случай)




## 2. Обзор статических методов распознавания для движущихся объектов

Говоря о статистических методах распознавания, мы предполагаем установление связи между отнесением объекта к тому или иному классу (образу) и вероятностью ошибки при решении этой задачи. В ряде случаев это сводится к определению апостериорной вероятности принадлежности объекта образу $s_1$ при условии, что признаки этого объекта приняли значения $x_1, x_2, \ldots, x_N$. Начнём с байесовского решающего правила. По формуле Байеса

$$p(s_i / x_1,\ldots,x_N) = \frac{P_0(s_i)\,p(x_1,\ldots,x_N / s_i)}{\sum_{j-1}^{M} P_0(s_j)\,p(x_1,\ldots,x_N / s_j)}. \qquad (1)$$

Здесь $P_0(s_i)$ – априорная вероятность предъявления к распознаванию объекта $i$ -го образа:

$$P_0(s_i) > 0,\ \sum_{i=1}^{M} P_0(s_i) = 1. \quad (2)$$

Для каждого $s_i$

$$\int_{x_1} \dots \int_{x_N} p(x_1,\dots,x_N / s_i)dx_1 \dots dx_N = 1, \quad (3)$$

при признаках с непрерывной шкалой измерений

$$\sum_{j_1=1}^{x_1} \dots \sum_{j_N=1}^{x_N} p(x_1^{j_1}, x_2^{j_2}, \dots, x_N^{j_N} / s_i) = 1, \quad (4)$$

при признаках с дискретной шкалой измерений

$$p(x_1,\dots,x_N / s_i) \geq 0. \quad (5)$$

При непрерывных значениях признаков $p(x_1,\dots,x_N / s_i)$ представляет из себя функцию плотности вероятностей, при дискретных – распределение вероятностей.

Распределения, описывающие разные классы, как правило, "пересекаются", то есть имеются такие значения признаков $x_1,\dots,x_N$, при которых

$$p(x_1,\dots,x_N / s_i) \cdot p(x_1,\dots,x_N / s_j) \rangle 0. \quad (6)$$

В таких случаях ошибки распознавания неизбежны. Естественно, неинтересны случаи, когда эти классы (образы) в выбранной системе признаков $(\overline{X}_1,\dots,\overline{X}_N)$ неразличимы (при равных априорных вероятностях решения можно выбирать случайным отнесением объекта к одному из классов равновероятным образом).[3]

В общем случае нужно стремиться выбрать решающие правила так, чтобы минимизировать риск потерь при распознавании.

Риск потерь определяется двумя компонентами: вероятностью ошибок распознавания и величиной "штрафа" за эти ошибки (потерями). Матрица ошибок распознавания:

| | $s_1$ | $s_2$ | $s_3$ | … | $s_M$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $s_1$ | $p_{11}$ | $p_{12}$ | $p_{13}$ | | $p_{1M}$ |
| $s_2$ | $p_{21}$ | $p_{22}$ | $p_{23}$ | | $p_{2M}$ |
| $s_M$ | $p_{M1}$ | $p_{M2}$ | $p_{M3}$ | | $p_{MM}$, |

(7)

где $p_{ii}$ – вероятность правильного распознавания;

$p_{ij}$ – вероятность ошибочного отнесения объекта $i$-го образа к $j$-му ($i \neq j$).

Матрица потерь

| | $s_1$ | $s_2$ | $s_3$ | … | $s_M$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $s_1$ | $u_{11}$ | $u_{12}$ | $u_{13}$ | | $u_{1M}$ |
| $s_2$ | $u_{21}$ | $u_{22}$ | $u_{23}$ | | $u_{2M}$ |
| $s_M$ | $u_{M1}$ | $u_{M2}$ | $u_{M3}$ | | $u_{MM}$, |

(8)

где $u_{ii}$ – "премия" за правильное распознавание;

$u_{ij}$ – "штраф" за ошибочное отнесение объекта $i$-го образа к $j$-му ($i \neq j$).

Необходимо построить решающее правило так, чтобы обеспечить минимум математического ожидания потерь (минимум среднего риска). Такое правило называется байесовским.[4]

Разобьём признаковое пространство $X$ на $M$ непересекающихся областей $v_j\,(j = 1,2,\dots,M)$, каждая из которых соответствует определённому образу.

Средний риск при попадании реализаций $q$-го образа в области других образов равен

$$r_q = \sum_{j=1}^{M} u_{qj} \int_{v_j} p(x_1, x_2, \ldots, x_N / s_q) dx_1 \ldots dx_N , \; q \neq j . \quad (9)$$

Здесь предполагается, что все компоненты $X$ имеют непрерывную шкалу измерений (в данном случае это непринципиально).[5]

Величину $r_q$ можно назвать условным средним риском (при условии, что совершена ошибка при распознавании объекта $q$-го образа). Общий (безусловный) средний риск определяется величиной

$$R = \sum_{q=1}^{M} P_0(s_q) r_q . \quad (10)$$

Решающие правила (способы разбиения $X$ на $v_j, j = 1, \; K, M$) образуют множество $D$. Наилучшим (байесовским) решающим правилом является то, которое обеспечивает минимальный средний риск $R_Б = \min_D R_D$, где $R_D$ – средний риск при применении одного из решающих правил, входящих в $D$.

Рассмотрим упрощённый случай. Пусть $u_{ii} = 0$, а $u_{ij} = 1$ ($i \neq j$). В таком случае байесовское решающее правило обеспечивает минимум вероятности (среднего количества) ошибок распознавания. Пусть $M = 2$. Вероятность ошибки первого рода (объект 1-го образа отнесён ко второму образу) [6]

$$p_{12} = \int_{v_2} p(\bar{x} / s_1) d\bar{x} , \quad (11)$$

где $\bar{x} = \{x_1, \ldots, x_N\}$ – вероятность ошибки второго рода

$$p_{21} = \int_{v_1} p(\bar{x} / s_2) d\bar{x} . \quad (12)$$

Средние ошибки

$$P_{ош} = P_0(s_1) p_{12} + P_0(s_2) p_{21} . \quad (13)$$

## Выводы

Работу интеллектуальной видеосистемы распознавания движущихся обьектов можно разбить на два основных этапа: 1) поиск необходимого объекта на изображении; 2) распознавание критериев объекта. Вероятность распознавания в первую очередь зависит от качества выполнения первого этапа. В этой работе рассмотрены основные методы выделения признаков объекта на изображении, приведены алгоритмы их работы. Показаны, результаты применения, статических методов системы распознавания движущихся объектов.

## Список литературы


1. *Максимов П.В., Вайнцвайг М.Н., Максимов В.В*. Проект системы, обучающейся целесообразному поведению. Математические методыраспознавания образов. Тезисы докладов 8-й Всероссийской конференции (ММРО-8), Москва. 1997, с. 83-84
2. *Журавлев Ю.И.* Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания и классификации/ В кн. Проблемы кибернетики, 1978, вып.33, с.5-86.
3. *Рудаков К.В.* Теория универсальных и локальных ограничений для задач классификации / В кн. Распознавание, классификация, прогноз. М.:Наука, 1988, вып. 1, с.239-251.
4. *Barner K.E., Arce G.R*. Permutation filters: a class of nonlinear filters based on set permutations // IEEE Transactions on Signal Processing 42 124-136 (1994).
5. *Неймарк Ю.И.* Математика как операционная система и модели // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 1. С. 82 - 85.
6. *Арлазаров В.Л., Астахов А.Д., Троянкер В.В., Котович Н. В*. Адаптивное распознавание символов. В сб. "Интеллектуальные технологии ввода и бработки информации", М.: Эдиториал УРСС, 1998

УДК: 531.7

*А.В. Борковский, ассистент*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# ВЫБОР СТРУКТУРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

*В связи с быстрым развитием роботов и интеллектуализацией их систем управления возникает необходимость в разработке моделей для робототехнических систем, основанных на их техническом зрении. Такие комплексы позволяют повысить эффективность обработки изображения при совместном использовании роботов и компьютеров.*

Полная система робототехнического зрения должна состоять из геометрической модель детали (эталон), которая храниться в базе данных компьютера и динамической модели измерительного робота включающего информационно-управляющую подсистему. Она необходима для разработки программной системы, обеспечивающего визуализацию рабочей зоны и взаимодействия оператора с робототехническим комплексом.

Требования к быстродействию электронного тракта СТЗ вытекают из требований к производительности робота, а также его метрологических и динамических характеристик. В общем случае инерционность системы СТЗ — система управления роботом — привод может быть описана постоянной времени

$$T_{\Sigma} = T_{сур} + T_{СТЗ} + T_{ПР}, \qquad (1)$$

где $T_{СУР}$ - постоянная времени, определяющая быстродействие системы управления роботом (СУР); $T_{СТЗ}$ - время цикла ввода и обработки видеоинформации; $T_{ПР}$ - постоянная времени, характеризующая быстродействие привода робота.

Расчет быстродействия вычислительной системы СТЗ робота проводят, например, в такой последовательности:

- исходя из метрологических или динамических характеристик робота или по заданной его производительности находят $T_{\Sigma}$
- по заданным значениям $T_{сур}$ и $T_{ПР}$ определяют
$$T_{СТЗ} = T_{\Sigma} - T_{ПР} - T_{сур} \qquad (2)$$
- по известным методикам, описанным в рассчитывают быстродействие вычислительной системы при требуемых объемах памяти, вводимой видеоинформации и выводимых в СУР данных

При выборе вычислительной системы необходимо разделить затраты времени на ввод и на обработку видеоинформации. Например, если кадр с форматом $N \times N$ разбит на m фрагментов, то суммарные затраты времени $T_{СТЗ}$ на его ввод и обработку составят (без учета временного перекрытия фаз ввода и обработки)

$$T_{СТЗ} = m\tau_{к} + m\tau_{обр}(N/\sqrt{m}), \qquad (3)$$

где $\tau_{к}$ - период повторения кадров; $\tau_{обр}$ - затраты времени на обработку одного фрагмента, являющегося функцией числа элементов $N/\sqrt{m}$ в фрагменте. Затратами времени на ввод $N^2$ элементов в ОЗУ в режиме прямого доступа к памяти (ПДП) пренебрегаем.

С ростом формата кадра и разрядности квантования, а также при использовании более сложных алгоритмов обработки изображения целесообразно переходить от разбиения кадра на жесткие фрагменты к формированию гибкого электронного окна. Затраты времени на ввод и обработку М. элементов, составляющих окно,

$$T_{СТЗ} = M\tau_к + \tau_{обр}(M) \qquad (4)$$

Ввод информации в этом случае может осуществляться программным путем с записью координат каждого элемента.

Определение быстродействия — темпа передачи сигналов (информационных слов) в вычислительную систему СТЗ — осуществляется в соответствии с временем выборки элементов видеодатчика (скоростью сканирования) и способом ввода.

При программном вводе темп ввода определяется временем цикла программы опроса буферного регистра интерфейса ввода и изменения состояния счетчика элементов датчика видеоизображения. Максимальный темп зависит от используемой программной среды, времени выполнения команд одного цикла, а также времени готовности интерфейса и выборки кадра. Максимально возможный темп определяется временем выборки кадра (частотой повторения кадров видеодатчика), а также максимально допустимым временем преобразования АЦП.

В случае аппаратного ввода целесообразно использовать режим ПДП. Темп ввода для ПДП задается циклом обращения к памяти. Результаты оценки требуемого быстродействия АЦП для реализации ПДП приведены в табл. 1. Для снижения требований к быстродействию АЦП возможна параллельная работа нескольких АЦП. Для n параллельно работающих АЦП минимальное время преобразования увеличивается в n раз, однако при этом возрастают аппаратные затраты (более чем в n раз).

**Таблица 1 -** Результаты оценки требуемого быстродействия АЦП.

| **Формат кадра (фрагмента), пиксели** | **Емкость ОЗУ К слов** | **Скорость передачи видеоинформации М слов/с** | | **Время АЦП преобразования (режим ПДП) мкс** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | *при времени обработки кадра, мс* | | | |
| | | *20* | *1* | *20* | *1* |
| 16x16 | 0,250 | 0,0125 | 0,250 | 80,0 | 4,0 |
| 32x32 | 1 | 0,05 | 1,0 | 20,0 | 1,0 |
| 64x64 | 4 | 0,2 | 4,0 | 5,0 | 0,25 |
| 128 x128 | 16 | 0,8 | 16,0 | 1,25 | 0,061 |
| 256 x256 | 64 | 3,2 | 64,0 | 0,31 | 0,015 |
| 512 x512 | 256 | 12,8 | 256,0 | 0,08 | 0,004 |
| 1024 x1024 | 1012 | 51,2 | 1024,0 | 0,02 | 0,001 |

По завершении описанной выше процедуры расчета быстродействия СТЗ выбирают тип вычислительной системы из имеющихся или формулируют требования ТЗ на разработку специализированной вычислительной системы

Ограничения на постоянную времени $T_\Sigma$, определяющую инерционность системы СТЗ — система управления роботом — привод, оказывающие решающее влияние на выбор вычислительной системы по критерию быстродействия, находят, например, исходя из заданной погрешности управления манипуляциями робота или из требований к устойчивости системы управления в целом (включая СТЗ).

Погрешность управления манипуляциями робота по сигналу, вырабатываемому СТЗ, выполняющей измерение какого-либо параметра x, можно разделить на две составляющие: статическую $\Delta x_{СТ}$ и динамическую $\Delta x_Д$. Величина $\Delta x_{СТ}$ определяется погрешностями тракта регистрации и обработки видеосигнала. Величина $\Delta x_Д$ обусловлена конечными затратами времени на обработку видеоинформации о динамических процессах. Для статических процессов $\Delta x_{Д=0}$ Динамическая погрешность $\Delta x_Д$ связана с характерной частотой со

изменений во времени управляемого процесса (манипулирования, обработки и т. п.) и постоянной времени $T_\Sigma$.

Пусть СУР, содержащая в общем случае экстраполятор т-го порядка, воспроизводит сигнал управления

$$x\left[(n+1)T_\Sigma\right] = x(nT_\Sigma) + \frac{\nabla x(nT_\Sigma)}{11} + \ldots + \frac{\nabla^m x(nT_\Sigma)}{m} \qquad (5)$$

где n- номер текущего временного цикла. Здесь экстраполятор вырабатывает сигнал управления для $n+1$ цикла с учетом значения параметра x в n-м цикле. Полагая, что с ростом порядка m конечные разности $\Delta_m x$ убывают, получим следующие соотношение между постоянной $T_\Sigma$ и допустимой динамической погрешностью:

$$\left|\Delta x_{Д}\right|_{ДОП} \geq \left|\nabla^{m+1} x(nT_\Sigma)/(m+1)t\right| \qquad (6)$$

Для динамических процессов

$$\nabla^{m+1} x(nT_\Sigma) \approx A\omega^{m+1} {T_\Sigma}^{m+1} \qquad (7)$$

поэтому $T_\Sigma \leq \frac{1}{\omega}\left[\left|\Delta x_{Д}\right|_{доп}(m+1)A)\right]$, где A – амплитуда производимого сигнала.

Требования к устойчивости процессов управления с помощью СТЗ и исключения автоколебательных процессов налагают ограничения на выбор результирующего времени реакции $T_\Sigma$ системы СТЗ — система управления роботом — привод на изменение управляемого параметра:

$$T_\Sigma \leq 2M/\left[\omega_c(M+1)\right] \qquad (8)$$

где M — показатель колебательности; $\omega$ — частота среза системы.

Требования к совместимости затрат времени на решение функциональных задач СТЗ с требованиями к временным характеристикам технологических циклов являются решающими при определении необходимых затрат аппаратных и вычислительных ресурсов.

На практике встречаются две основные ситуации:

СТЗ обеспечивает необходимое быстродействие и не нарушает временные характеристики технологических циклов робототехнических систем;

достижение необходимого быстродействия СТЗ экономически нецелесообразно, поэтому скорость выполнения технологических циклов роботами и оборудованием принудительно ограничивается для согласования с быстродействием СТЗ.

Возможна промежуточная ситуация, когда на одних этапах технологического цикла производительность определяется быстродействием СТЗ, а на других — быстродействием ПР и технологического оборудования.

Выбор оптимальной структуры вычислительных средств СТЗ осуществляют на основе технико-экономического анализа, руководствуясь следующими критериями:

- соответствие технических возможностей вычислительных средств решаемым задачам;
- необходимый уровень гибкости вычислительных средств с учетом перспективы развития данной СТЗ за предполагаемое время ее «жизни» при минимальных затратах на аппаратуру и программирование;

- максимальное время наработки на отказ при минимальных аппаратных и программных затратах
- экономическая целесообразность изготовления опециализиро-ванных вычислительных средств с учетом доступности комплектации СТЗ универсальными вычислительными средствами;
- совместимость вычислительных средств СТЗ о вычислительными средствами, используемыми на тех же и на более высоких уровнях иерархии робототехники (ГПС).

## Выводы

В связи с постоянным расширением технических возможностей, увеличением доступности и числа поступающих на рынок серийных универсальных микропроцессорных средств и микроЭВМ имеет место тенденция к постепенному вытеснению специализированных вычислительных средств универсальными и к оптимальному сочетанию минимального объема специализированных вычислительных средств с универсальными. С учетом создания специализированных БИС для обработки изображений последняя тенденция представляется наиболее перспективной.

## Список литературы

1. *Д.А. Денисов, А.К. Дудкин.* Идентификация визуальных объектов с использованием знаний/ // Системы технического зрения. – М. Наука, 1991. – 200с.

2. *Ерганжиев Н.А.* Цветное телевидение в измерительной технике. – М.: Связь, 1980. – 104 с.

3. *Абламейко С.В., Лагуновский Д.М.* Обработка изображений: технология, методы, применение. – Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 300 с.

4. *Горелик С.Л., Кац Б.М., Киврин В.И.* Телевизионные измерительные системы. – М.: Связь, 1980. – 168 с.

5. *Гринберг А.Д., Гринберг С.* Цифровые изображения: Практическое руководство: Пер. с англ. – Минск: Попурри, 1997. – 400 с.

6. *Гуленко И.Е.* Система видеозахвата и анализа движения – распознавание трансформаций и движения объекта. – Труды конференции “Новые информационные технологии” (Судак, Крым, 15–25 мая 2004 г.)

УДК 004.896:62-50

*В.П. Квасников, д.т.н., Л.О. Бабич, аспирант, К.С. Бабич*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОЙ НЕЙРО-НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ ANFIS ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЯ ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

*В статье рассмотрен вариант управления интеллектуальным мобильным роботом на основе гибридной нейро-нечеткой системы. Рассмотрен типичный способ конструирования гибридных архитектур на примере систем, функционально эквивалентных системам Сугено Построена и обучена компьютерная модель гибридной нейро-нечеткой системы принятия решения объезда препятствия.*

**Введение.** Интеллектуальный мобильный робот (ИМР) – это техническая система, которая способна автономно (без вмешательства человека) выполнять предварительно поставленные задачи (двигаться к предварительно поставленным целям) в изначально неизвестной среде. Одним из критериев, которым должен отвечать ИМР – это принятие решение на основании формализированных данных. В таком случае роль человека в управлении ИМР свидится только к постановке задачи. Одной из задач ИМР является принятие решения объезда препятствия.

**Анализ публикаций.** В основе нечеткой логики лежит теория нечетких множеств, изложенная в серии работ Лотфи Заде (Lotfi Zadeh) в 1965–1973 годах [1-2]. В этих работах рассматриваются элементы множеств, для которых функция принадлежности представляет собой не жесткий порог (принадлежит/не принадлежит), а плавную сигмоиду (часто упрощаемую ломаной линией), пробегающую все значения от нуля до единицы.

В [3] рассмотрены методы анализа и синтеза систем управления с нечеткой логикой, на основе которых построены траектории с точностью до 0,1 мм.

**Постановка задачи.** Целью данной работы есть разработка системы принятия решения объезда препятствия с использованием гибридной нейро-нечеткой системы функционально эквивалентной системам Сугено.

**Решение задачи.** Решение задачи принятия решения объезда препятствия возможно с помощью нечеткой логики и нечетких баз знаний. Понятие нечеткого множества – это попытка математической формализации нечеткой информации для построения математических моделей. В основе этого понятия лежит представление о том, что составляющие данное множество элементы, обладающие общим свойством, могут обладать этим свойством в различной степени и, следовательно, принадлежать к данному множеству с различной степенью.

Гибридные нейро-нечеткие системы (далее просто гибридные системы) нашли гораздо большую область применения, чем все остальные методы синтеза нечетких множеств и нейронных сетей.Связано это с тем, что именно они позволяют наиболее полно использовать сильные стороны нечетких систем и нейронных сетей. Характерной чертой гибридных систем является то, что они всегда могут быть рассмотрены как системы нечетких правил, при этом настройка функций принадлежностей в предпосылках и заключениях правил на основе обучающего множества производится с помощью нейронных сетей. Существует несколько архитектур гибридных систем, каждая из которых предназначена для решения своего круга задач. Это накладывает определенные сложности в изучении и применении данных систем.

Рассмотрим типичный способ конструирования гибридных архитектур на примере систем, функционально эквивалентных системам Сугено.

Для простоты изложения предположим, что система имеет только две входные переменные и два правила:

$R_1$: если $x_1$ есть $A_{11}$ и $x_2$ есть $A_{12}$, то $y = c_{11}x_1 + c_{12}x_2$,

$R_2$: если $x_1$ есть $A_{21}$ и $x_2$ есть $A_{22}$, то $y = c_{21}x_1 + c_{22}x_2$.

Выход системы находится по формуле

$$y = \frac{\alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2}{\alpha_1 + \alpha_2}, \quad (1)$$

где $y_i$ — выход i-го правила.

Данная система может быть реализована в виде нейроподобной структуры, состоящей из пяти слоев (рис. 1), называемой адаптивной нейро-нечеткой системой вывода (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System, ANFIS) :

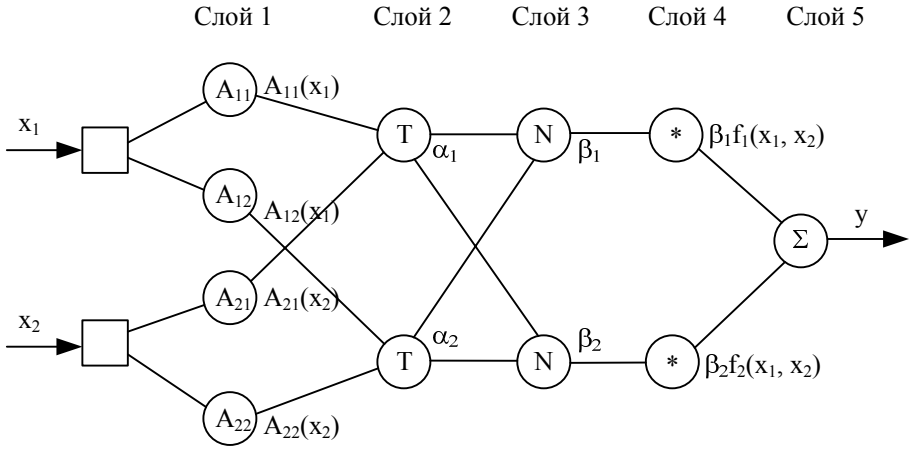



Рис. 1. Адаптивная нейро-нечеткая система вывода (ANFIS)

*Слой 1*.Выходы нейронов этого слоя представляют собой степени принадлежностей входных значений нечетким множествам, ассоциированным с нейронами. Обычно применяются гауссовские функции принадлежности:

$$A_{ij}(x) = \exp\left[-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{x - a_{ij}}{b_{ij}}\right)^2\right], \quad (2)$$

где $a_{ij}$ — множество параметров, требующих настройки в процессе обучения.

Также могут быть использована произвольная непрерывная функция, например, трапециевидной или треугольной формы. Данные параметры называются *предпосылочными*.

• *Слой 2*.Каждый нейрон этого слоя вычисляет уровень истинности правила по формуле $\alpha_i = A_{i1}(x_1) \wedge A_{i2}(y_0), i = 1,2,$ где для моделирования связки «и» может использоваться дифференцируемая t-норма. Нейрон этого слоя называются *нейронами правил*.

• *Слой 3*. На данном слое производится нормализация уровней истинности каждого правила по формулам $\beta_i = \alpha_i / \alpha_1 + \alpha_2$ .

• *Слой 4*. Выходы нейронов представляют произведение нормализованных значений уровней истинности на соответствующие выходы правил: $y_i = \beta_i \cdot (c_{i1} \cdot x_1 + c_{i2} \cdot x_2)$.

• *Слой 5*. Нейрон последнего (выходного) слоя производит адаптивное суммирование выходов нейронов предыдущего слоя.

К сожалению, наличие множества различных реализаций приводит к тому, что процедура обратного распространения ошибки не может быть непосредственно использована в обучении гибридных систем. Тем не менее, параметры гибридной системы могут быть найдены на основании обучающего множества $\{x_i, y_i\}, i = \overline{1,k},$ с помощью методов градиентной оптимизации. Нахождение градиента функционала качества работы

системы должно определяться для каждой отдельной архитектуры, при этом следует принимать во внимание суперпозиционный характер преставления гибридных нейро-нечетких систем. Дополнительным является требование дифференцируемости отображений, реализуемых системой. Это, в свою очередь, отражается в необходимости выбора дифференцируемых функций принадлежностей, t-норм, t-конорм и операции агрегации.

Приведем способ настройки параметров функций принадлежностей для архитектуры ANFIS. Требуется определить значения переменных $a_{ij}$, $b_{ij}$, $c_{ij}$, $i, j = 1, 2$, минимизирующих ошибку

$$J = \frac{1}{2}\sum_{l=1}^{k} e_i^2 = \frac{1}{2}\sum_{l=1}^{k}\left(y^l - \tilde{y}^l\right)^2 \tag{3}$$

где $y^l = y\left(\tilde{x}^l\right)$ — выход гибридной системы при входе из обучающего множества $\left\{\tilde{x}^l, \tilde{y}^l\right\}, l = 1, k$ (множитель 1/2 введен для удобства, он не влияет на оптимум функционала).

Будем считать, что в качестве оператора «и» и импликации используется произведение. Алгоритм нахождения градиента, учитывающий суперпозиционную структуру нейро-нечеткой системы, состоит из нескольких этапов:

1. Вычисление частных производных функционала по параметрам выходного слоя:

$$\frac{\partial J}{\partial c_{ij}} = \left[\sum_{l=1}^{k}\left(y^l - \tilde{y}^l\right)\right]\cdot\beta_i\cdot x_j, i, j = 1,2 \tag{4}$$

2. Нахождение промежуточных производных:

$$\frac{\partial J}{\partial \beta_i} = \left[\sum_{l=1}^{k}\left(y^l - \tilde{y}^l\right)\right]\cdot\left(c_{i1}\cdot x_1 + c_{i2}\cdot x_2\right), i, j = 1,2, \tag{5}$$

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial \alpha_i} = \frac{\alpha_i}{\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)^2}, \tag{6}$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial A_{i1}} = A_{i2}, \tag{7}$$

$$\frac{\partial \alpha_i}{\partial A_{i2}} = A_{i1}, \tag{8}$$

3. Вычисление производных по параметрам предпосылок:

$$\frac{\partial A_{ij}}{\partial a_{ij}} = A_{ij}\cdot\frac{x_i - a_{ij}}{b_{ij}^2} \tag{9}$$

$$\frac{\partial A_{ij}}{\partial b_{ij}} = \frac{\partial A_{ij}}{\partial a_{ij}}\cdot\frac{x_i - a_{ij}}{b_{ij}} \tag{10}$$

на основе производной сложной функции искомые значения вычисляются по формулам

$$\frac{\partial J}{\partial a_{ij}} = \frac{\partial J}{\partial \beta_i}\cdot\frac{\partial \beta_i}{\partial \alpha_i}\cdot\frac{\partial \alpha_i}{\partial A_{ij}}\cdot\frac{\partial A_{ij}}{\partial a_{ij}} \tag{11}$$

$$\frac{\partial J}{\partial b_{ij}} = \frac{\partial J}{\partial \beta_i}\cdot\frac{\partial \beta_i}{\partial \alpha_i}\cdot\frac{\partial \alpha_i}{\partial A_{ij}}\cdot\frac{\partial A_{ij}}{\partial b_{ij}} \tag{12}$$

Для гибридных сетей другой структуры вывод алгоритма настройки параметров функций принадлежности производится аналогично.

Заметим, что структура ANFIS также обладает линейно-нелинейной по параметрам структрой. Действительно, параметры $a_{ij}$ и $b_{ij}$ в общем случае входят нелинейно (например, в случае гауссовской и сигмоидной функций), параметры же $c_{ij}$ — нелинейно. Следовательно,

для настройки параметров может быть применен метод Голуба-Перейры, позволяющий настраивать параметры в предпосылках правил, линейно входящие в заключения параметры далее определяются автоматически.

Для синтеза и исследования гибридной нейро-нечеткой системы управления интеллектуальным мобильным роботом использован инструмент anfisedit программного комплекса MatLab.

Для формирования структуры гибридной нейро-нечеткой системы необходимо сформировать обучающую последовательность, записав ее в файл test.dat и передав этот файл инструменту anfisedit

На основании полученной из файла test.dat обучающей последовательности инструмент anfisedit генерирует гибридную нейро-нечеткую систему со следующими характеристиками: количество термов для входа 1 – 6 термов, для входа 2 – 6 термов. Используется нечеткий логический вывод по алгоритму Сугено, то есть нечеткая база знаний будет иметь вида:

$R_1$: если $x_1$ есть $A_{11}$ и $x_2$ есть $A_{12}$, то $y = c_{11}x_1 + c_{12}x_2$,

$R_2$: если $x_1$ есть $A_{21}$ и $x_2$ есть $A_{22}$, то $y = c_{21}x_1 + c_{22}x_2$.

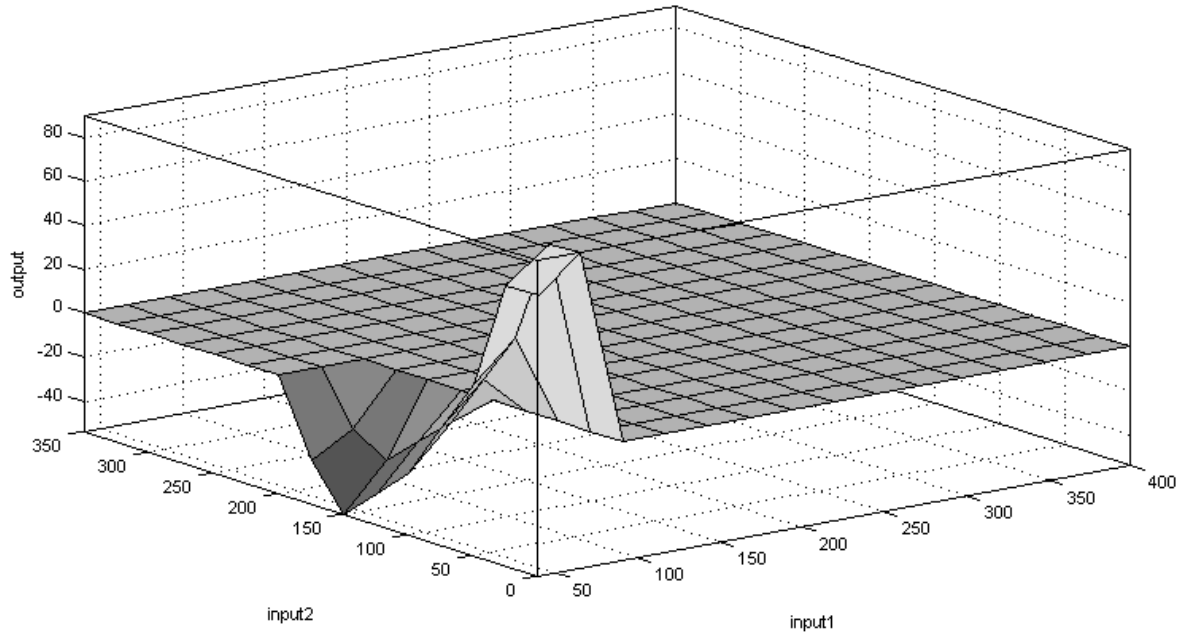



Рис. 2. Проходная характеристика обученной гибридной нейро-нечеткой системы

## Выводы

Предложено вариант решения задачи объезда препятствия интеллектуальным мобильным роботом на основании гибридных нейро-нечетких систем. Получена переходная характеристика системы принятия решения обхода препятствия интеллектуальным мобильным роботом. Дальнейшим развитием будет реализация предложенной системы в реальном робототехническом комплексе и натурных испытаний поведения ИМР при объезде препятствий и формировании траектории движения. Также, возможно введение дополнительных входных значений (дополнительных датчиков) и правил для обеспечения избыточности.

## Список литературы

*1. Beliman R. E., Zadeh L. A.,* Decision-Making in Fuzzy Environment // Management Science.– 1970.– №17. – P. 141-164.

*2. Усков А.А., Круглов В.В.* Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики. Смоленск.–Смоленская гор. типография, 2003.–177 с.

УДК 53.089

*В.П. Квасніков, д.т.н, Р.О. Задорожній, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МЕТОДИКА ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ ОБ'ЄКТІВ ЗОНДОВИМ МІКРОСКОПОМ

*Сформульовані проблеми вимірювання геометричних розмірів об'єктів в нанометровому діапазоні, визначені важливі методи їх вирішення. Представлена методика вимірювання в нанометровому діапазоні, та основи метрологічного забезпечення вимірювань.*

Складною проблемою вимірювання розмірів топології поверхні на скануючому зондовому мікроскопі (СЗМ) в діапазоні від 1...до 1000 нм є проблема вибору алгоритму процедури вимірювань. Алгоритмів вимірювання розмірів мікроструктур, що загально використовуються в даний час, не існує [1]. Труднощі тут виникають через неспівпадання реальної форми профілю рельєфу вимірюваного елементу і форми реєстрованої кривої відеосигналу, що одержується при скануванні цього елементу зондом мікроскопа. Відсутнє навіть строге визначення поняття розміру елементу. В технології виробництва НВІС елементи формованої на напівпровідниковій пластині мікросхеми мають, як правило, профіль, близький до трапецієвидної форми. В цьому випадку слід говорити про розміри верхнього і нижньої основ такого елементу рельєфу.

В основі атомно-силової мікроскопії (АСМ) лежить взаємодія зонду зі зразком, що носить складний характер. В процесі вимірювання розмірів топології поверхні на атомно-силовому мікроскопі можлива поява спотворень які варто враховувати при оцінці точності вимірювання методами АСМ. Причинами яких є деформація зонду та пружна деформація об'єктів, що досліджуються [2].

Пружні деформації накладають свої обмеження на точність АСМ. За рахунок деформацій змінюється рельєф зразка. Рішення задачі Герца дозволяє знайти глибину взаємного проникнення зонда і поверхні зразка у вимірюваннях:

$$\Delta x = \sqrt[3]{\frac{F^2}{K^2 R}}$$

де $F$– прикладена сила, $K$– ефективний модуль Юнга для пари матеріалів зонд-зразок, $\frac{1}{R} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r'}$, де $r$, $r'$– радіуси кривизни зонда і зразка.

З врахуванням такої взаємодії зонда зі зразком, як об'єктом вимірювання, запропонована математична модель формування результату вимірювання розмірів топології поверхні на АСМ:

$$y(x)=k(x-\Delta x)+h=kx-k\Delta x+h,$$

де $x$ – розмір топології поверхні, що вимірюється; $\Delta x$ – зміна величини $x$ завдяки деформації зонду та пружної деформація об'єкта, що досліджується; $h$ – зміщення зонда за рахунок неортогональності сканера; $k$ – коефіцієнт чутливості.

З якої знайдем мультиплікативну складову результату вимірювання:

$$y_x = kx,$$

та адитивну складову:

$$y_{\Delta x} = -k\Delta x+h.$$

Таким чином, взаємодія зонда зі зразком зводиться до адитивного збурення, що діє на величину яка вимірюється і приводить до появи адитивної похибки при вимірювання розмірів топології поверхні за допомогою АСМ.

Проведемо аналіз методу вимірювання елемента рельєфу у вигляді виступу поверхні твердого тіла, профіль якого має форму трапеції з рівними бічними сторонами. Для цього розглянемо геометричну модель взаємодії вістря зонда з елементом рельєфу, коли на СЗМ вимірюється параметри профілю одиночного виступу на поверхні.

Приймаємо, що висота рельєфу *H,* кут нахилу бічних сторін щодо нормалі до поверхні $\varphi$, розміри верхньої $u_p$ і нижньої $b_\text{р}$ основи задані. Перетин вістря зонда будемо характеризувати частиною кола з радіусом $R$ і кутом нахилу $\alpha$ бічних утворюючих вістря щодо осі симетрії. При цьому зонд може бути нахилений на кут $\beta$ щодо нормалі до площини основи елемента. Схеми виступу та сигналу, що одержують, показані на рис. 1 (припускається, що ортогональність сканера по осі Z ідеальна).

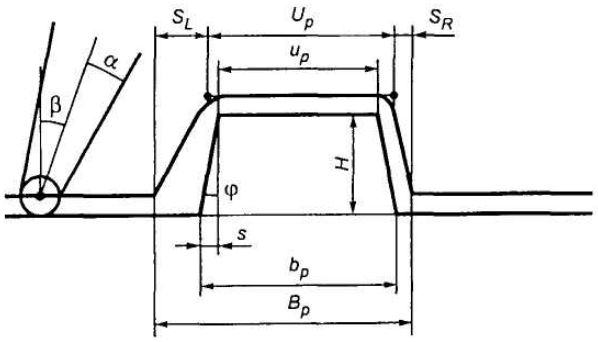



Рис. 1. Схема трапецієподібного виступу і сигналу СЗМ з параметрами виступу і сигналу

У випадку $H > R,$ що характерний для сканування зондом СЗМ елементів структур сучасних НВІС [4], криву сигналу відгуку, яка реєструється СЗМ, показано на рис. 1 лінією, що проходить через центр кола вістря зонда. Крива сигналу відгуку за формою близька до трапеції з бічними сторонами, що мають різні кути нахилу. Приведені довжини $U_p$ і $B_p$ відрізків, що характеризують верхню й нижню основи елемента рельєфу, будуть більше їхніх розмірів $u_p$ і $b_\text{р}$ на значення $\Delta_u$ і $\Delta_b$, які визначаються виразами:

$$\Delta_u = U_p - u_p = R\left(\frac{1-\sin|\Psi|}{\cos|\Psi|} + \frac{1-\sin|\varphi|}{\cos|\varphi|}\right), \tag{1}$$

$$\Delta_b = B_p - b_p = R\left(\frac{1-\sin|\Psi|}{\cos|\Psi|} + \frac{1-\sin|\varphi|}{\cos|\varphi|}\right) + H\left(tg|\Psi| - tg|\varphi|\right), \tag{2}$$

де $\psi$ – кут нахилу бічних схилів сигналу СЗМ по нормалі до осі розгорнення.

Він визначається виразом:

$$\Psi = \begin{cases} \alpha+\beta, & \alpha+\beta > \varphi, \\ \varphi, & \alpha+\beta \le \varphi, \end{cases} \tag{3}$$

і може бути різним для різних схилів (рис. 1). У виразах (1) - (2) ураховуються різні знаки кутів $\varphi$ і $\psi$ нахилів лівих і правих сторін виступу та сигналу.

Формули (1) і (2) є поправками, які необхідно враховувати при вимірюванні розмірів верхньої та нижньої основи виступу по СЗМ сигналу відгуку, що реєструється.

У результаті дослідження формування зображення в СЗМ запропонована математична модель формування результату вимірювання розмірів мікроструктур, згідно якої всі структури діляться на дві групи:

• трапецієвидні структури з малими кутами нахилу бічних стінок щодо нормалі до поверхні;

• трапецієвидні структури з великими кутами нахилу бічних стінок щодо нормалі до поверхні.

При традиційному представленні зонда АСМ його вістря є конусом з кутом нахилу твірної $\alpha$, що закінчується сферою радіусом $r$, плавно зістикованою з конусом [2,3]. Вісь конуса вістря зонда може бути нахилена на кут $\beta$ щодо нормалі до поверхні, тому сигнал АСМ виходить асиметричним навіть при скануванні симетричних структур і відсутності неортогональності $Z$-сканера.

На рис. 2. приведена загальна схема сигналу, одержуваного на атомно-силовому мікроскопі, і показані вимірювані параметри сигналу[4].

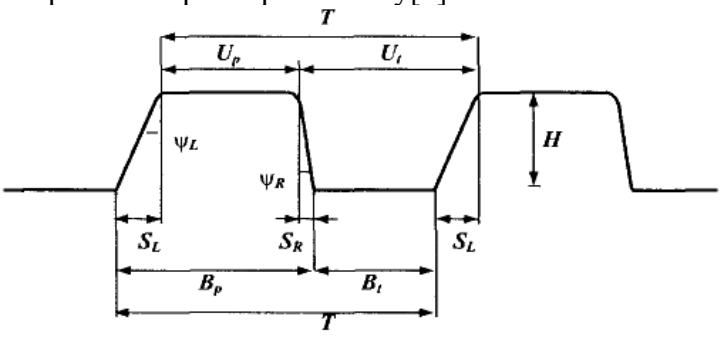



Рис. 2. Схема сигналу АСМ, що отримується при скануванні крокової структури

Сучасні зонди мають радіуси $r$, для яких виконуються умови малості радіусу щодо розмірів елементів трапецієвидної структури:

$$s = h\,\mathrm{tg}\varphi >> 2r, \quad u_{p,t} >> 2r, \quad b_{p,t} >> 2r.$$

У цьому випадку розміри структури можна визначити за допомогою виразів:
для виступу

$$u_p = m_x U_p - r\,[Q(\Psi_L) + Q(\Psi_R)] / 2 + 2h + \Delta x,$$
$$b_p = m_x B_p - r\,[Q(\Psi_L) + Q(\Psi_L)] / 2 - m_z H\,(\mathrm{tg}\,\Psi_L - \mathrm{tg}\,\Psi_R) + 2h + \Delta x;$$

для канавки

$$u_t = m_x U_t + r\,[Q(\Psi_L) + Q(\Psi_R)] / 2 - 2h + \Delta x,$$
$$b_t = m_x B_t + r\,[Q(\Psi_L) + Q(\Psi_L)] / 2 + m_z H\,(\mathrm{tg}\,\Psi_L - \mathrm{tg}\,\Psi_R) - 2h + \Delta x;$$
$$Q(\Psi) = 2\left(\frac{1-\sin\Psi}{\cos\Psi}\right)$$

де $m_x$ і $m_z$ – ціни поділу шкал осей $X$ і $Y$ сканерів АСМ, $h$– величина деформації зонду та об'єкта, що досліджується; $\Delta x$ – зміщення зонда за рахунок неортогональності сканера.

Проекції похилих стінок сигналу визначаються висотою сигналу $H$ і кутами нахилу бічних стінок сигналу $\Psi_L$ і $\Psi_R$:

$$S_L = H\,tg\Psi_L$$
$$S_R = H\,tg\Psi_R$$

де

$$\Psi_{L,R} = \begin{cases} \alpha + \beta, & \alpha + \beta > \varphi; \\ \alpha, & \alpha + \beta \le \varphi, \end{cases},$$

де $\beta$ – кут нахилу осі вістря кантилівера щодо вертикалі до поверхні, $\alpha$ – половина кута розчину конуса, $\varphi$ – кут нахилу бічних сторін рельєфу щодо нормалі до поверхні .

З математичної моделі формування результату вимірювання розмірів мікроструктур виявлено, що у випадку коли виступи на поверхні мають кут нахилу бічних стінок менше кута розкриву конуса зонду $\alpha$, на топології поверхні схилів виступу матимемо бічну поверхню зонда, а не поверхні бічних стінок за рахунок взаємодії зонда зі зразком тільки бічною поверхнею. Щоб уникнути цього недоліку запропонований двопрохідний метод

сканування поверхні. Він дає змогу в процесі сканування досягти більше ділянок поверхні, тому з більшою достовірністю можна відновити поверхню, що досліджується.

Згідно цього методу при прямому проході зонду над поверхнею його вісь нахилена під кутом $\beta = 90^{\circ} - \alpha$ до поверхні, що сканується, ( рис. 3. а). При зворотному проході зонду кут $\beta$ змінюється на протилежний, $\beta = 90^{\circ} + \alpha$ ( рис. 3. а).

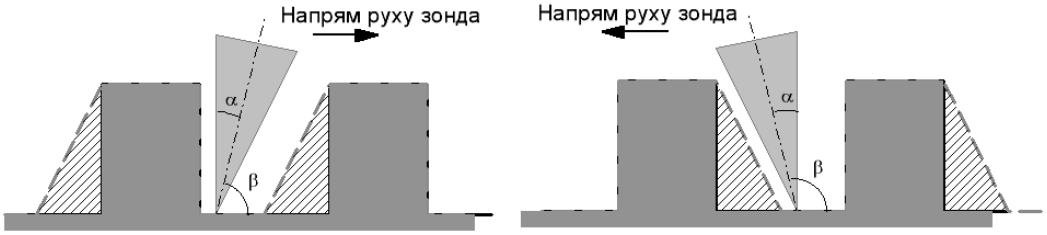



Рис. 3. Траєкторія проходження зонда над поверхнею а) в прямому напрямку, в) в зворотному напрямку

В результаті ми отримаємо дві топології поверхні які мають реальне відображення поверхні відповідно тільки на задніх та передніх схилах виступів. Шляхом суміщення цих двох топологій поверхонь (рис. 4), та вибору точок з мінімальною висотою отримаємо результуючу поверхню з повним відтворенням бічних стінок виступів на поверхні.

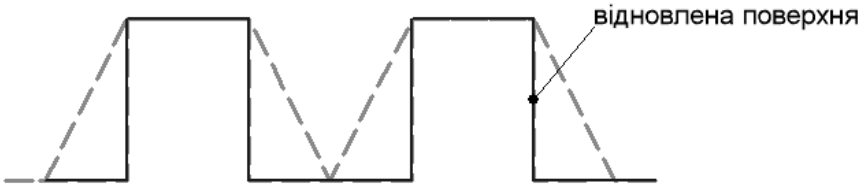



Рис. 4. Суміщення топології поверхонь, що отримані в процесі прямого та зворотного сканування

## Висновки

Як видно з аналізу моделі взаємодії вістря зонда з нанорельєфом поверхні об'єкта, для кількісних вимірювань, крім визначення ціни ділення шкали СЗМ, необхідно також внесення поправок, які враховують спотворення, обумовлені геометричними параметрами вістря зонда. Запропонована двопрохідна методика дає змогу більш точно відтворювати топологію поверхні з кутами нахилу бічних стінок менше кута нахилу твірної конусу зонда $\alpha$.

## Список літератури

1. *Задорожній Р.О.* Проблеми розробки еталонної інформаційно-вимірювальної системи геометричних розмірів об’єктів в нанометровому діапазоні // Обчислювальна техніка та автоматизація. Збірник наукових праць Донецького державного технічного університету. Донецьк. ДонДТУ. – 2007.– №12(118). – С.205-209.

2. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии: Навч. посіб. – Нижний Новгород: Российская академия наук, Институт физики микроструктур, 2004. – 114 с.

3. *Быков В.А.* Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхностей: Дис. доктора техн. наук: 05.27.01 – М., 2000.– 393 с.

4. *Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Раков Я.В., Тодуа П.А.* Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. – 2006. – том.62. – С. 36-76.

УДК 004. 032.26 (045)

*А.Н. Миколушко, асистент*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# ПУТИ РАЗВИТИЯ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ РЕАЛИЗАЦИИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

*В настоящий момент существуют различные способы реализации искусственных нейронных сетей (ИНС), которые имеют ряд как преимуществ, так и недостатков. Часто становится вопрос о способе реализации ИНС и соответственно о возможностях подобной реализации, что в свою очередь заставляет задуматься о возможных путях дальнейшего развития средств реализации искусственных нейронных сетей.*

Искусственные нейронные сети (ИНС) – математические модели, а также их программные или аппаратные реализации, построенные по принципу организации и функционирования биологических нейронных сетей – сетей нервных клеток живого организма. Это понятие возникло при изучении процессов, протекающих в мозге при мышлении, и при попытке смоделировать эти процессы. Впоследствии такие модели стали использовать в практических целях: для принятия решений в системах управления, распознавания образов и кластеризации, прогнозирования и сжатия данных. Парадигма нейронных сетей позволяет создавать простые и высокопроизводительные аппаратные средства для моделирования нейронных сетей.

Искусственные нейронные сети за свою более чем полувековую историю существования оказали существенное влияние на ряд наук, положив начало развитию новых, а также созданию подразделов в уже существующих. Хотя ИНС базируются на определенных математических принципах, это не препятствует их применению в областях, не связанных (или связанных косвенно) с математикой, а напротив, способствует решению трудных задач, открывая новые перспективы.

Существуют два способа реализации искусственных нейронных сетей – аппаратная и программная.

Программная реализация, уступая аппаратной по автономности и скорости работы, обладает рядом очевидных преимуществ, связанных в первую очередь с простотой использования и внедрения в информационно-управляющую систему.

При использовании нейронной сети, наиболее эффективна оптимизированная под данную конкретную задачу программная реализация. Когда требования к скорости обучения высоки, разработка конкретной программной реализации нейронной сети становится необходимостью.

Несмотря на то, что работы по программной реализации нейронных сетей осуществляются на протяжении более чем тридцати лет, найти библиотеку программ, пригодную для использования в некоторой разрабатываемой системе может быть сложно.

Часто ставится задача разработки библиотеки программ позволяющей моделировать и обучать нейронные сети в системах реального времени. В этом случае для организации обучения могут быть использованы методы признанные в настоящее время наиболее эффективными. Под эффективностью алгоритма понимают в первую очередь время работы алгоритма, а в последнюю – объем требуемых ресурсов. В тоже время при одинаковой эффективности предпочтение будет отдаваться алгоритмам более простым в реализации. В качестве возможных функций активации сети может рассматриваться линейная функция

$$f(u)=u$$

и гиперболический тангенс

$$f(u)=(e^{u}-e^{-u})/(e^{u}+e^{-u}).$$

Существует огромное количество алгоритмов обучения нейронных сетей. Для произвольной задачи нельзя заранее сказать какой из них будет наиболее быстрым. Однако для сетей большой размерности (с числом весовых коэффициентов больше 500-1000), лучшие результаты дают методы основанные на применении сопряженных градиентов, и различные эвристические алгоритмы [1]. Методы сопряженных градиентов довольно сложны в реализации. Например, метод масштабируемых сопряженных градиентов (scaled conjugate gradient), показывающий лучшие результаты из этого класса методов, требует вычисления производных второго порядка целевой функции [2].

Задано множество пар векторов $\{x,d\}$ называемое обучающим множеством, где $\{x\}$ входной вектор, а $\{d\}$ желаемый выходной вектор. $\{y\}$ – множество реакций нейронной сети на вход $\{x\}$. Тогда мера разницы между $\{y\}$ и $\{d\}$ ($E=|| y - d ||$) называется ошибкой обучения. Используя среднюю квадратичную меру ошибки получим

$$E = \frac{1}{SM} \sum_{i=1}^{S} \sum_{j=1}^{M} (y_j^i - d_j^i)^2$$

где S – число обучающих пар, M – размерность выходного вектора.

Задача обучения нейронной сети сводится к поиску таких значений весовых коэффициентов $w_{i,j}^{(k)}$, чтобы ошибка обучения $E$ стала меньше некоторого значения $\varepsilon$ ( $E < \varepsilon$ ).

В качестве языка программирования используется широко известный и легко переносимый на другие платформы язык C++.

В системах реального времени построение математических моделей управляемых процессов должно быть автоматизировано в максимально возможной степени. Поэтому возникает потребность интегрирования нейросетевого комплекса в систему управления, что позволить повысить ее адаптивные свойства.

При использовании нейронной сети, наиболее эффективна оптимизированная под данную конкретную задачу программная реализация. Когда требования к скорости обучения высоки, разработка конкретной программной реализации нейронной сети становится необходимостью.

В настоящее время решение основной части практических задач с помощью ИНС обеспечивается использованием коммерческого программного обеспечения на основе методов нейрологики, исполнение которых, что естественно, происходит с помощью центрального процессора. Это вполне логично, главным образом из-за того, что это относительно новая область, а создание ПО достаточно гибкий процесс, что позволяет тестировать и внедрять с малыми затратами некоторые экспериментальные методы. Однако специализированные аппаратные средства (которые могут обеспечить поддержку или замену определенных программных пакетов) предлагают в определенных ситуациях заметные преимущества.

Рассмотрим более детально достоинства аппаратной реализации ИНС перед программным исполнением. К наиболее важным причинам следует отнести:

1. Скорость, которая может быть увеличена благодаря возможности проведения параллельных вычислений (особенно в задачах, требующих проведения повторных, итеративных вычислений). Благодаря этому снижается нагрузка на центральный процессор устройства, если таковое работает в составе системы, и, соответственно, повышается скорость исполнения других приложений.

2. Стоимость. Применение устройств на основе ИНС может снизить общую стоимость системы. Аппаратные средства реализации ИНС менее чувствительны к мощности центрального процессора, сохраняя при этом высокие показатели скорости.

3. Надежность. По схожим причинам аппаратная реализация может обеспечить более высокую надежность функционирования системы, в смысле меньшей вероятности отказа оборудования.

4. Специальные эксплуатационные режимы. В ряде применений, налагающих ограничения на размеры, вес и другие физические характеристики, этот фактор может стать решающим.

5. Безопасность. В плане защиты авторских прав, сопротивления взлому и другим противоправным действиям, применение аппаратной реализации позволяет обеспечить лучшую защиту по сравнению с эквивалентными функциями ПО на основе ИНС

Существует большое количество типов рассматриваемых устройств, которые могут применяться в зависимости от поставленных и выполняемых задач:

1. Нейрокомпьютеры.
2. Чипы.
3. Клеточные библиотеки.
4. Встроенные микрокомпьютеры.

Можно выделить три широких класса аппаратного обеспечения ИНС: цифровое, аналоговое и гибридное исполнения. В рамках этих категорий используется различная архитектура и методы для реализации необходимых функций.

Развитие аппаратных средств реализации ИНС может пойти следующими путями:

1. Путем усовершенствования методов для реализации нейросетевых методов на FPGA (Field Programmable Gate Array, ПЛИС, Программируемая Логическая Интегральная Схема), VLSI (Very Large Scale Integration, СБИС, уровень интеграции, при котором количество элементов на одной микросхеме исчисляется тысячами и миллионами).

Современная элементная база позволяет создавать нейрокомпьютеры для моделирования нейронных сетей, содержащих сотни тысяч нейронов и сотни миллионов межнейронных связей при стоимости нейрокомпьютера в несколько тысяч долларов [3].

2. Путем исследований и внедрению инновационных алгоритмов построения ИНС, которые осуществимы аппаратными средствами.

3. Разработкой промышленного стандарта нейросетевых алгоритмов высокого уровня в промышленности.

Разработанные методы должны легко адаптироваться к нуждам промышленности, достаточно просто реализовываться. Но для этого необходимо специализированное ПО с полным набором нейросетевых функций (для цифрового, аналогового и гибридного исполнений). Немаловажно и исследование методов внедрения ИНС в уже существующие системы, создания на их основе гетерогенных систем. Вообще говоря, цепь обработки информации может начинаться с аналоговых датчиков и заканчиваться аналоговыми исполнительными устройствами, или система может быть полностью цифровой, в любом случае необходима оптимизация на уровне системы, а не отдельных ее составляющих.

Поскольку нейронная сеть представляет собой большое количество одинаковых параллельно работающих простейших элементов — нейронов, то при ее аппаратной реализации желательно обеспечить массовое параллельное выполнение простейших операций, причем чем большая степень параллельности вычислений достигается, тем лучше. Традиционным методом повышения степени параллельности вычислений является каскадирование процессоров, т.е. объединение нескольких процессоров в единой вычислительной системе для решения поставленной задачи. Поскольку процессоры работают независимо друг от друга, то вроде бы достигается необходимая степень параллельности. Однако не следует забывать об обмене данными между процессорами. Если 32-разрядные процессоры работают на тактовой частоте, предположим, 200 МГц, а 32-разрядные каналы связи обеспечивают передачу данных с частотой, например, 20 МГц, то такие межсоединения будут на порядок замедлять совместную скорость работы соединенных между собой процессоров. Разработчики параллельных систем всеми силами борются с этой

проблемой, но скорость современных процессоров все равно растет быстрее, чем пропускная способность каналов передачи данных.

## Выводы

Традиционно считается, что нейронные сети можно успешно реализовать на универсальных процессорах или на специализированных нейронных процессорах (нейрочипах).

Универсальные микропроцессоры, представителем которых является такое семейство как Intel 386/486/Pentium/PII/PIII, являются наиболее доступными и успешно используются для моделирования нейронных сетей. Доступность и распространенность компьютерных систем, построенных на таких процессорах, являются значимыми достоинствами для их применения. В качестве их основных недостатков для моделирования нейронных сетей обычно отмечается избыточность архитектуры и сложности при построении многопроцессорных систем для увеличения суммарной производительности.

Принято считать, что нейрочип – это специализированный процессор, оптимизированный для массового выполнения нейронных операций: скалярного умножения и нелинейного преобразования. У большинства разработчиков слово «процессор» ассоциируется со сверхбольшими интегральными схемами (СБИС). Поэтому бытует расхожее мнение, что нейрочип – это заказной или полузаказной цифровой кристалл, архитектура которого как раз и оптимизирована под нейронные операции. В мире не один десяток фирм поддерживают это мнение делом; практически все известные на сегодняшний день коммерческие нейрочипы выполнены в виде СБИС. А поскольку нейрочип это СБИС, то для разработки новой его модели необходимо проектировать новый кристалл, что является удовольствием недешевым и может окупится либо большой серией либо высокой ценой кристалла. Отсюда вывод: нейрочип вещь дорогая и редкая. Также следует отметить, что специализированные нейрочипы проигрывают по скорости вычислений наиболее современным универсальным процессорам.

Выход из данной ситуации может заключаться в реализации ИНС на ПЛИС. Во-первых, ПЛИС дешевы и проектирование устройства на их базе занимает всего месяц-другой. Во-вторых, большое количество вентилей ПЛИС позволяет реализовать достаточно много физически параллельно работающих нейронов. В-третьих, высокая тактовая частота работы ПЛИС способствует высокой скорости вычислений в нейроне.

Таким образом, ПЛИС в гораздо большей степени, чем сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), удовлетворяет критерию эффективности для нейронных процессоров: большая интеграция позволяет реализовать много параллельно работающих нейронов.

## Список литературы

1. *Осовский С.* Нейронные сети для обработки информации: Пер. с польского. М: Финансы и статистика, 2002.

2. *Moller, M.F.* ‘A scaled conjugate gradient algorithm for fast supervised learning’, Neural Networks, vol. 6, 1993.

3. *Головко В.А.* Нейронные сети: обучение, организация и применение. – М.: Издательское предприятие редакции журнала «Радиотехника», 2001.

УДК 681.562

*О.В. Кочеткова, к.т.н., М.С. Руднєва, к.т.н.*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРИ РОЗРОБЦІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО РОБОТА

*Розглядається нечіткий алгоритм управління на основі нейронних мереж та вирішуються задачі нечіткої нейромережевої апроксимації алгоритмів.*

**Вступ.** Високі експлуатаційні характеристики технічних систем, у тому числі вимірювальних систем вимірювальних роботів (ВР) протягом життєвого циклу виробу передбаченому регламентом робіт, досягаються контролем широкої гами параметрів на всіх стадіях технологічних процесів. В цих умовах використання апарата нейронних мереж представляє собою перспективний напрямок.

Дослідження, що проводяться в області використання теорії нечітких множин в додатках до робототехніки концентруються головним чином в трьох направленнях: розпізнавання зображень; інтелектуальне управління приводами; інтелектуальне управління рухом вимірювальних роботів в середовищі з перешкодами.

Нечіткі нейронні мережі (НМ) отримали широке розповсюдження при побудові інформаційно-вимірювальних систем, вони є зручним інструментом для побудови чисельних моделей. Слід відмітити, що нейромережеві технології дозволяють істотно розширити класи вирішуваних задач – це інтелектуалізація процесів розпізнавання образів, адаптивне управління, апроксимація функціоналів, рішення систем чітких і нечітких лінійних алгебраїчних рівнянь з сингулярною матрицею, задачі прогнозування і ідентифікації, створення експертних систем, організація асоціативної пам’яті та ін.

Автоматизовані засоби забезпечення управління потребують максимального уявлення про геометричну форму об’єктів, особливості управління ними та про функціональні і апаратні властивості систем управління рухом. Разом з тим точність представлень може привести до значної невизначеності в оцінках характеристик руху.

Побудова оптимального управління потребує повної апріорної інформації про стан системи, що визначається на етапі розрахунку адекватної математичної моделі об’єкту. Подальше використання прийнятої моделі в задачах синтезу системи керування вимірювальною головкою повністю визначає форму і вид оптимальних керуючих сигналів [1-3].

Раціональним підходом до організації обчислень з нечіткими алгоритмами управління в яких формуються управляючі впливи на вимірювальний робот в реальному масштабі часу з великим обсягом обчислень для обробки нечітких даних, є використання нечітких комп’ютерів, нейрокомп’ютерів та комплектуючих їх обчислювальних систем. Перевага в даному випадку надається побудові обчислювальних схем, що використовують нечітку нейроапроксимацію алгоритмів [4-6], яка не потребує розробки програмного забезпечення та має достатньо універсальні, для забезпечення обчислень, структури систем нечітких правил [7] або штучних нейронних мереж.

**Постановка задачі дослідження.** Ціллю проектування ВР з елементами нечітких НМ є побудова обчислювальної структури чи алгоритму, що працює за принципами штучного інтелекту.

**Розв’язання поставленої проблеми.** Модель роботи вимірювального робота будується на основі принципу раціонального поєднання математичних та інформаційних компонентів. Математичні компоненти, які відповідають елементам моделі, описуються тими ж рівняннями, що і при класичному моделюванні. Інформаційні компоненти відображають зв’язки між характерними параметрами елементів моделі, що представляються у формі нейронних мереж, реалізованих за допомогою комп’ютерних програм з самонавчанням.

Одним із компонентів системи управління рухом вимірювального наконечника є база

знань, що дозволяє накопичувати інформацію про невипадкові зв'язки між подіями в системі [3]. В поточний момент часу нейрони вхідного шару блоку формування і розпізнавання отримують інформацію з блоку датчиків, на виході якого формуються одиничні сигнали. В базу знань для її навчання (донавчання) поступає вектор перетвореної інформації $V$. Знання, що накопичуються в базі знань в процесі навчання, використовуються системою керування.

Задача системи управління – здійснення пошуку найбільш оптимального способу досягнення цілі та завдання команди максимально до неї наближеної. У випадку, коли пошук на множині $A$ навчених дій не приводе до відшукання рішення необхідно систему донавчити на множині дій, яким система не навчена [8].

При обході перешкод розташованих на шляху руху вимірювального наконечника КВМ системою безпеки руху приймається рішення, що призводе, у випадку необхідності, до зміни шляху руху вимірювального наконечника.

Реакцією системи попередження катастроф є виконання визначеного набору дій для управління рухом вимірювального наконечника і зміна при цьому траєкторії руху.

У випадку, коли система безпеки руху не буде враховувати попередні стани і реакції, то можливе повторне виконання дій чи неможливість виходу із тупикового положення.

Алгоритм управління рухом вимірювального робота повинен забезпечувати спрямовану зміну маршруту вимірювального наконечника (ВН) до об'єкту вимірювання (ОВ) в системі координат $XOY$ (рис. 1).

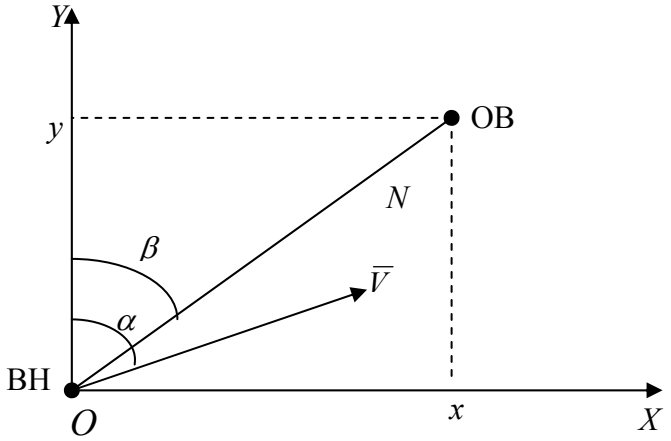



Рис.1. Координати та параметри руху вимірювального наконечника до об'єкту вимірювання

Введемо наступні позначення: $x$, $y$ – поточні координати ОВ; $\overline{V}$ – вектор швидкості руху ВН до об'єкту вимірювання; $N$, $\beta$ – кут та відстань до ОВ.

Відстань $N$ та кут $\beta$ пов'язані з координатами $x$, $y$ наступними співвідношеннями:

$$x = N\sin\beta, \quad x = N\cos\beta. \tag{1}$$

Ціллю управління рухом ВН є виконання умови $N \to \min$. ВН фіксує зміни вихідної величини та контролює зовнішні збурення, що діють на об'єкт. Для цього в дискретні моменти часу за допомогою сенсорної системи вимірюються кут та відстань, які можуть бути інтерпретовані нечіткими множинами на основі концепції м'яких вимірювань [4]. З цієї точки зору з $N$ та $\beta$ пов'язують лінгвістичні змінні «ВІДСТАНЬ» та «КУТ».

Нечіткі значення $\widetilde{N}$ та $\widetilde{\beta}$ дозволяють визначити нечіткі координати ОВ в системі координат $XOY$ (рис.1), використовуючи співвідношення (1). Нечітка інтерпретація кута $\widetilde{\alpha}$ обчислюється по формулі

$$\widetilde{\alpha} = arctg(\widetilde{X} / \widetilde{Y}), \qquad (2)$$

де $\widetilde{X}$, $\widetilde{Y}$ – нечітка оцінка координат.

Враховуючи лінгвістичне уявлення всіх елементів (2), даний вираз апроксимується нечіткою продукційною системою [4]

$$c: \ якщо \ \ \widetilde{X} \ \ є \ \ \widetilde{X}^c \ \ та \ \ \widetilde{Y} \ \ є \ \ \widetilde{Y}^c, \ \ то \ \ \alpha \ \ є \ \ \widetilde{\alpha}^c, \ \ c = \overline{1,c}, \qquad (3)$$

де $c$ – номер правила, а $C$ – кількість правил, $\widetilde{X}^c$, $\widetilde{Y}^c$ та $\widetilde{\alpha}^c$ – лінгвістичні змінні.

Нечіткий алгоритм містить систему (3) та механізм нечіткого логічного виводу і алгоритм методу чіткої інтерпретації нечіткого виводу.

На вхід алгоритму надходять результати м'яких вимірювань, що представлені нечіткими оцінками $\widetilde{X}'$ та $\widetilde{Y}'$. Для опису даного алгоритму управління в термінах нейромережевих алгоритмів потрібно розв'язати задачу синтезу нейронної мережі.

В нечіткому нейроні для обчислення функцій синоптичного перетворення $\nu_i(\upsilon_i, x_i)$ та функція агрегування $\gamma(z_1,...,z_n)$ використовується в якості функції активації $f_a(b)$ – сигмоїд.

Поєднання таких елементів в паралельно-розподілені структури є універсальним апроксиматором, що дозволяє інтерпретувати неперервні нечіткі функції.

Розглянемо нейроапроксимацію системи нечітких продукційних правил [4], що мають вигляд

$$c: \ якщо \ \ \widetilde{X}_1' \ \ є \ \ \widetilde{X}_1^c \ \ и \ \ ... \ \ и \ \ \widetilde{X}_n^c \ \ є \ \ \widetilde{X}_n^c, \ \ то \ \ y \in \widetilde{Y}^c, \ \ c = \overline{1,C}, \qquad (4)$$

де $\widetilde{X}'^T = \left[\widetilde{X}_1',...,\widetilde{X}_n'\right]$ – вектор вхідних нечітких даних системи (4), $\widetilde{X}_1^c,...,\widetilde{X}_n^c, \widetilde{Y}^c$ – нечіткі множини задані своїми функціями приналежності, $y$ – вихід нейрону.

Для побудови нейромережевого апроксиматора заданого відображення на основі багатошарової нейтронної мережі зі стандартними нейронами необхідно визначати значення синоптичних ваг [5,6], що вирішується в процесі навчання мережі за заданими послідовностями вхідних і вихідних сигналів.

Нечіткі продукційні системи можна представити в термінах багатошарової нейронної мережі з нечіткими нейронами на прикладі правила системи (4), де правило має P різних антецедентів для консеквентної частини виду «$y \in \widetilde{Y}^c$», кожне p – правило визначає процедуру обчислення міри можливості $Pos_{\widetilde{Y}^c}^p$ по n-входам, а поєднання в правило с виконується на основі операції max. Для системи із C продукційних правил, апроксимуюча її мережа містить таку ж кількість паралельних нечітких багатошарових нейронних мереж.

Результати успішного вибору за певних умов проміжних точок можуть автоматично узагальнюватися в нові правила. Вибір визначається на підставі рішень при певному наборі параметрів, які виникають при застосуванні правил, і надалі саме ці набори параметрів фіксуються в нових правилах.

Умова – є довільна логічна формула, а в слідстві можуть бути вказані кон'юнкція (І) або альтернатива (АБО). Умовою є формулювання деякого завдання з даної наочної області (в даному випадку з області знань «побудова траєкторій»).

Завдання включає як формулювання того, що треба зробити, так і її параметри (як чисельні, так і уточнюючі умови або метод рішення).

Слідство є вказівкою на метод, та на алгоритм і програму, навіть програмний модуль. Правила організовані в структуру графа, часто ієрархічну, тобто деревовидну, і вказують послідовний процес рішення задачі.

Структуру бази знань можна представити у вигляді двовимірної матриці де номери

рядів і стовпчиків представляють собою номери образів, що розпізнаються і номери вхідних впливів відповідно, але для більш повного представлення кількісної інформації в [3] запропоновано доповнити її кубом асоціативних нейронів, здатних по заданій інформації і заданій дії знаходити кінцевий стан в наступний момент часу та зазначено доцільність використання трьохшарової бази знань для систем управління.

Проектування систем управління рухом ВР здійснюється в напрямку забезпечення необхідного запасу стійкості шляхом вибору структури і параметрів нейромережевого регулятора, що дозволяють враховувати велику кількість можливих режимів руху вимірювального наконечника ВР.

Рух вимірювального наконечника в загальному випадку здійснюється під впливом зовнішніх збурень, що приводять до втрати стійкості і суттєво підвищують складність вирішуваної задачі. Алгоритм керування для розв'язання цієї задачі базується на ідеях нейромережевого керування і передбачає поєднання аналітичного розрахунку законів керування рухом вимірювального наконечника ВР з нейромережевою реалізацією такого закону.

## Висновок

Розроблена архітектура координатно-вимірювальної машини з використанням нейронних мереж. Запропоновано новий напрямок для використання у вимірювальній техніці та розроблений обчислювальний алгоритм, що працює за принципами штучного інтелекту.

## Список літератури


1. *Девятисильный А.С., Дорожко В.М., Гриняк В.М.* Нейроподобные алгоритмы высотной классификации движущихся объектов // Информационные технологии. – 2001. – №12. – С.45-51.

2. *Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю* Нейрсетевые системы управления. Кн. 8. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480с.

3. *Крыжановский М.В., Магомедов Б.М.* Организация нейросетевой базы знаний в интеллектуальных управляючих системах // Искусственный интеллект. – 2003. – №3. – С. 497-503.

4. *Сиек Ю.Л.* Нейросетевая аппроксимация нечеткого алгоритма управления подводным аппаратом // Нейрокомпьютеры. – 2006.– №6. – С. 22–30.

5. *Киселёв Д.В., Ющенко А.С.* Нечеткое управление поведением мобильных роботов // Вестник МГТУ. Сер. Приборостроение. – 2001. – №1. – С. 86–99.

6. *Усков А.А.* Принципы построения систем управления с нечеткой логикой // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – №6. – С. 7-13.

7. *Крыжановский М.В., Магомедов Б.М.* Организация нейросетевой базы знаний в интеллектуальных управляющих системах // Искусственный интеллект. – 2003. – №3. – С. 497-503.

8. *Кошевцов М.Б.* Система автоматического обхода препятствий мобильным роботом // Искусственный интеллект. – 2003. – №1. – С. 166-172.

УДК 629.753

*Н.М. Шибицька, к.т.н., Г.А. Тимофієва, аспірант,*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# КРИТЕРІАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ ЗНАНЬ ЛЬОТНОГО ЕКІПАЖУ

*Проведено критеріальний аналіз систем діагностики знань із визначеними коефіцієнтами складності питань тестових завдань. Доведено, що тестові завдання із визначеними ваговими коефіцієнтами питань запропонованою методикою валідні, а це в свою чергу дозволяє адекватно характеризувати складність тестових завдань та рівень підготовки льотного екіпажу.*

Аналіз авіаційних подій і помилкових дій, скоєних з вини льотного екіпажу, показав, що в основі лежить недостатній рівень професійних знань, навичок, умінь. Варто підкреслити, що професійна надійність в значній мірі залежить від професійної підготовки авіаційних спеціалістів ще на етапі отримання освіти у вищих навчальних закладах. В той же час метою модернізації сучасної освіти є підвищення якості знань тих, хто навчається, яка, в свою чергу, залежить не тільки від учбової роботи педагогів, але й від якості тестових завдань (ТЗ), необхідних для перевірки знань. У зв'язку з вступом багатьох провідних вищих навчальних закладів країни до Болонської системи освіти, проведення контролю, без застосування тестування, взагалі неможливе. Тому, при оцінці знань досить широко використовують таку форму контролю, як тестування [1] для визначення рівня знань та вмінь авіаційних операторів на комп'ютерних тренажерах.

Для створення тестів необхідна математична обробка результатів тестування та визначення якості систем діагностики знань [2]. Оскільки, тест являє собою вимірювальний інструмент, то необхідно звернути увагу на те, що процес вимірювання в інформаційних системах ускладнений в зв'язку з відсутністю еталонних одиниць. Тому, необхідна максимальна відповідність даного тесту основним критеріям, що визначають якість методу: надійність, валідність та точність. Переважна більшість існуючих систем контролю знань проводить лише оцінку знань і не проводить жодних оцінок якості самого тесту, в них відсутня можливості корегувати тестові завдання (ТЗ), не враховується таке поняття, як складність питань ТЗ. Відомо, що безпідставне збільшення складності ТЗ призводить до збільшення часу на проведення тестування, що в свою чергу, призводить до швидкого стомлення операторів, а це збільшує кількість помилок.

Таким чином завдання створення та дослідження надійності ТЗ, на основі яких стане можливою побудова сучасної автоматизованої системи контролю знань є доволі актуальним.

Аналіз літератури [2, 4, 6] дозволяє виділити дві найбільш поширених форми ТЗ: закрита та відкрита. ТЗ закритої форми складається із питання та варіантів відповіді, до складу якої входить правильна (еталонна). На даний час поширення набуває ТЗ відкритої форми, що являє собою сукупність завдань із довільно сконструйованою відповіддю. В таких системах найчастіше потрібне повне співпадіння із еталоном відповіді. Як правило, оператор отримує 1 за правильне виконане завдання, а за неправильне 0. Така дихотометрична система оцінювання не може надати повної інформації о знаннях оператора, тому що, в такому випадку, необхідно велика кількість питань, що збільшує кількість помилок. Отже, при розробці ТЗ необхідно враховувати їх складність питань. При цьому найкраще використовувати обидві форми питань.

Отже, дослідження ТЗ із визначеними коефіцієнтами складності питань представляє науковий інтерес.

В [3] запропоновано методику розрахунку вагових коефіцієнтів (індексів складності) $w_j$, де $s$ - кількість питань, $i = \overline{1,s}$, що визначають достовірність результатів контролю знань. За допомогою вагових коефіцієнтів враховується ступінь складності ТЗ по відношенню до інших, задається максимальна кількість балів, яку може отримати оператор при правильному

виконанні завдання. А це у свою чергу визначає кількісну та якісну характеристику знань. Для покращення достовірності результатів тестування при проектному розрахунку пропонується визначати вагові коефіцієнти за допомогою експериментального тестування.

Тест є інструментом, що складається з кваліметрично вивереної системи ТЗ, стандартизованої процедури проведення, із заздалегідь спроектованої технології обробки та аналізу результатів. Тому ТЗ повинні відповідати певним критеріям: об'єктивність, надійність, валідність, точність. Серед усіх критеріїв виділяють дві найважливіших властивостей: надійність та валідність. Надійність тесту розглядається як така характеристика, що відображає точність вимірювання та стійкість результатів до дії сторонніх факторів [6]. Тобто, під надійністю розуміють узгодженість результатів проведення тесту на одній і тій самій дослідній групі при різних педагогічних умовах.

Валідність тесту – критерій його якості, ступінь відповідності тесту своєму призначенню вимірювати те, для чого він створений, а також дійсна здатність тесту вимірювати ту характеристику, для якої він заявлений [6].

Проведемо дослідження ТЗ із визначеними коефіцієнтами складності питань згідно методики [3] із питаннями комбінованої форми. Нехай, числова оцінка $ball_{ij}$ успішності виконання $j$-го завдання $i$-им оператором, де $j=\overline{1,n}$, $i=\overline{1,s}$, $n$ та $s$ - кількість операторів та питань відповідно. Представимо результати тестування у вигляді матриці $\{ball_{ij}\}$ з $n$ рядками та $s$ стовпцями. Матриця результатів показує виконання всіх завдань тими, хто навчається.

Розглянемо процес статистичної обробки результатів та розрахуємо надійність ТЗ.

Знайдемо індивідуальні бали кожного оператора $ball_i^{ind}$ (1).

$$ball_i^{ind}=\sum_{j=1}^{s} ball_{ij} \tag{1}$$

Знайдемо середнє значення сумарних балів $\overline{ball}$ (2) учасників тестування та середній результат операторів за кожне завдання (3):

$$\overline{ball}=\frac{\sum_{i=1}^{n} ball_i^{ind}}{n} \tag{2}$$

$$\overline{\mathrm{ball}_{\mathrm{j}}^{\mathrm{ind}}}=\frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{ball}_{\mathrm{ij}}}{\mathrm{n}} \tag{3}$$

Для розрахунку надійності тестового завдання необхідно знайти дисперсію $d_{ball}^2$ (4), стандартне відхилення $d_{ball}$ сумарних балів учасників тестування та величину $d_j^2$ –дисперсію результатів опреторів по $j$ –ому завданню (6), де $j=\overline{1,s}$.

$$d_{ball}^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(ball_i^{ind}-ball_n)}{n-1} \tag{4}$$

$$d_{ball}=\sqrt{d_{ball}^2} \tag{5}$$

$$\mathrm{d}_{\mathrm{j}}^2=\frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}(\mathrm{ball}_{\mathrm{ij}}-\overline{\mathrm{ball}_{\mathrm{j}}^{\mathrm{ind}}})^2}{\mathrm{n}-1} \tag{6}$$

Визначимо коефіцієнт кореляції Пірсона (7) для тих номерів питань, коефіцієнти складності яких однакові:

$$R_j = \frac{\frac{\sum_{i=1}^{n}(ball_{ij} \times ball_i^{ind})}{n} - \overline{ball_j^{ind}} \times \overline{ball}}{d_j \times d_{ball}} \times \frac{n}{n-1} \qquad (7)$$

Надійність ТЗ тим вища, чим вища погодженість результатів тестування окремих частин одного й того ж ТЗ. Погодженість питань із однаковими коефіцієнтами складності визначається коефіцієнтом Кьюдера-Річардсона (8):

$$\beta = \frac{d_{ball}^2 - \sum_{j=1}^{s} d_j^2}{2d_{ball}^2} + \sqrt{\left(\frac{d_{ball}^2 - \sum_{j=1}^{s} d_j^2}{2d_{ball}^2}\right)^2 + \frac{\sum_{j=1}^{s} R_j^2 d_j^2}{2d_{ball}^2}} \qquad (8)$$

Коефіцієнт надійності Кьюдера-Річардсона дає об'єктивний результат у випадку, коли припущення, що питання із однаковими коефіцієнтами складності ідентичні, є правдивим. В іншому випадку розрахуємо коефіцієнт надійності $\alpha$ за формулою (9) [7]:

$$\alpha = \frac{s}{s-1}\left[1 - \frac{\sum_{j=1}^{s} \sigma_j^2}{\sigma_{ball}^2}\right] \qquad (9)$$

де $s$ - кількість питань ТЗ, $\sigma_{ball}^2$ - квадрат стандартного відхилення для всього ТЗ (10), $\sigma_j^2$ - квадрат стандартного відхилення результатів тестування для кожного питання (13).

$$\sigma_{ball}^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(ball_i' - ball^s)^2 \qquad (10)$$

де $ball_i'$ - результат $i$-го оператора (11), $ball^s$ - середнє значення за все ТЗ (12), $n$ - кількість операторів.

$$ball_i' = \frac{\sum_{j=1}^{s} ball_{ij}'}{s}. \qquad (11)$$

$$ball^s = \frac{\sum_{i=1}^{n} ball_i'}{n} \qquad (12)$$

Розрахуємо квадрат стандартного відхилення для всього ТЗ:

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(ball_{ij} - ball_j{}^s)^2 \qquad (13)$$

Проведемо на прикладі аналіз системи діагностики знань. Під час тестування операторам були запропоновані питання із відкритою формою відповіді, тобто необхідно ввести свою відповідь. Якщо відповідь оператора невірна, то йому надавалася можливість обирати одну із запропанових варіантів відповідей. При цьому в системі вже визначені коефіцієнти згідно методики [3], але паралельно розраховувалися результати тестування у дихотометричній системі, а саме, оператор отримував 0 або 1 в залежності від відповіді.

За результатами тестування були розраховані надійність $\alpha$ (1) ТЗ, загальна складність $w$ ТЗ та кількість $s$ питань (6).

*Таблиця 1*

| Вид ТЗ | Коефіцієнт складності $w$ | Надійність $\beta$ ТЗ | Надійність $\alpha$ ТЗ | Загальна складність $w$ | Кількість $s$ питань |
|---|---|---|---|---|---|
| Відкрита форма | $w = \begin{cases} 0, \text{якщо відповідь не вірна} \\ 1, \text{якщо відповідь правильна} \end{cases}$ | 0.7 | 0.68 | 0.82 | 15 |
| Закрита форма | | 0.68 | 0.65 | 0.5 | 15 |
| Комплексна форма | $w = [0,...,1]$ | 0.89 | 0.84 | 0.7 | 15 |
| Нормовані значення | | $> 0.8$ | $> 0.7$ | $0.35 \le w \le 0.84$ | $\le 30$ |

Таким чином, як видно із таблиці 1 за статистичними параметрами використання обох форм тестових питань із визначеними коефіцієнтами складності за запропонованою методикою є валідним. Для достовірного визначення рівня знань необхідна менша кількість питань із визначеними коефіцієнтами.

## Висновки

Таким чином, проведено критеріальний аналіз систем діагностики знань льотного екіпажу із визначеними коефіцієнтами складності питань ТЗ. Проведено порівняльний аналіз валідності відкритої та закритої форм питання дихотометричної тестової системи, із комплексною формою ТЗ, де коефіцієнт складності $w$ питання визначається згідно методики.

Виявлено, що валідність залежить від кількості та якості питань. Доведено, що ТЗ із визначеними ваговими коефіцієнтами питань запропонованою методикою валідні, а це в свою чергу дозволяє адекватно характеризувати складність тестових завдань та рівень підготовки операторів. При цьому така методика не вимагає достатньо великої кількості експериментальних даних на відміну від інших відомих параметричних моделей.

Врахування коефіцієнта складності $w$ у ТЗ із комплексною формою питання дозволяє отримати валідність у необхідних границях для меншої кількості питань, а це, в свою чергу, зменшує час необхідний для підготовки ТЗ та проведення тестування.

## Список літератури


1. *Аванесов В.С.* Основы научной организации педагогического контроля в высшей школе. – М.: МИСиС, 1989. – 168 с.

2. *Олійник М.М.* Тест як інструмент кількісної діагностики рівня знань в сучасних технологіях навчання – Донецьк: ДонНУ, 2001. – 84 с.

3. *Шибицька Н.М., Тимофієва Г.А.,* Інформаційна технологія визначення складності питань в тестових завданнях// Проблеми інформатизації та управління. – 2009. - № 3- С.114-119

4. *Федорчук П.І.* Адаптивні тести: статистичні методи аналізу результатів тестового контролю знань // Математичні машини і системи. – 2007. – №3,4. – С. 122–138.

5. *Долинер Л.*И. Компьютерные тесты успеваемости как средство оптимизации ученого процесса // Вестник Московского университета.-2004 - №1.

6. *Клайн Пол.* Справочное руководство по конструированию тестов. Перевод Е.П.Савченко. – М.: «Пан Лтд.»,1994., 283 с.

УДК 681.518

*А.В. Гопиенко, аспирант, Т.М. Пирог*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# ПОВЫШЕНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

*В работе проанализирована возможность повышения скорости передачи данных в цифровых системах связи за счет применения различных видов модуляции и кодирования.*

**Вступление.** Развитие информационных технологий сопровождается увеличением объема создаваемой, обрабатываемой и хранимой информации. В качестве примера можно рассмотреть всемирную информационную сеть Internet. Чаще всего информация в сети представлена в виде текстовых документов, изображений, электронных таблиц, аудио и видеоданных, а также Web-документов. В частности, резкое увеличение объема хранимой, передаваемой и обрабатываемой информации спровоцировано ростом социальных сетей, увеличением количества мобильных телефонов с выходом в Интернет и развитием электронных баз данных. Существенный объем занимает информация с цифровых камер и снимки со спутников.

Также необходимо выделить стремительно развивающиеся технологии «м2м» – интерфейс типа «машина-машина». К ним можно отнести автоматизированные системы навигации и управления транспортом, электронные платежные системы, различные системы удаленного сбора измерительной информации, контроля и управления объектами, охранные системы [1].

Вследствие увеличения объемов передаваемой информации ужесточаются требования к системам передачи информации.

Для цифровых систем связи характерно конечное количество элементарных сигналов. В такой системе задачей приемника является не точное воспроизведение переданного сигнала, как в аналоговой системе связи, а определение на основе искаженного шумами сигнала, какой именно сигнал из конечного набора был послан передатчиком.

Важным критерием производительности цифровой системы связи является вероятность ошибки. Низкая частота возникновения ошибок, а также применение процедур выявления и коррекции ошибок делает возможным передачу информации с высокой точностью и меньшими затратами по сравнению с применением аналоговых систем связи. Из недостатков цифровых систем связи следует отметить необходимость в более интенсивной обработке сигнала по сравнению с аналоговыми системами, выделении значительных ресурсов для синхронизации передатчика и приемника на различных уровнях. Кроме того, ухудшение качества сигнала имеет пороговый характер – если отношение сигнал/шум ниже некоторого порога, качество сигнала может скачком измениться от хорошего до плохого.

**Цель:** проанализировать возможность повышения скорости передачи данных в цифровых системах связи за счет применения различных видов модуляции и кодирования.

**Решение.** В ходе разработки цифровой системы связи разработчик должен стремиться обеспечить:

1) увеличение скорости передачи бит $R$ до максимально возможной;
2) минимизацию вероятности появления битовой ошибки $P_b$;
3) минимизацию потребляемой мощности, или минимизации требуемого отношения энергии одного бита к спектральной плотности мощности шума $E_b/N_0$;
4) минимизацию ширины полосы пропускания $W$;
5) повышение эффективности использования системы, т.е. к обеспечению надежного обслуживания для максимального числа пользователей с минимальными задержками и максимальной устойчивостью к возникновению конфликтов;

6) минимизацию конструктивной сложности системы, вычислительной нагрузки и стоимости системы.

Очевидно, что требования 1 и 2 противоречат требованиям 3 и 4; они предусматривают одновременное увеличение скорости $R$ и минимизацию $P_b$, $E_b/N_0$, $W$. Существует несколько сдерживающих факторов и теоретических ограничений, которые неизбежно влекут за собой компромиссы в любых системных требованиях:

- Минимальная теоретически требуемая ширина полосы частот по Найквисту
- Теорема о пропускной способности Шеннона-Хартли (и предел Шеннона)
- Государственное регулирование (например, распределение частот)
- Технологические ограничения (например, современные комплектующие)
- Другие системные требования (например, орбиты спутников)

Государственное регулирование заключается в распределении частотного ресурса государства, выдачи лицензий на работу в требуемых частотных диапазонах и мощностью передатчика системы, а также в контроле и выявлении источников случайных или преднамеренных помех.

Частотный ресурс может быть пополнен за счет применения более высоких частот несущих сигналов, сужения спектра сигнала, формируемого передатчиком и уменьшения мощности излучаемого сигнала. В последнем случае стабильная работа канала связи обеспечивается повышением чувствительности приемника и более совершенными алгоритмами обработки сигнала – демодуляции, декодирования и восстановления информации.

Технологические ограничения заключаются в том, что современная элементная база позволяет достичь определенных рабочих частот и максимальной мощности передатчика, выше которых построение системы связи экономически не выгодно или невозможно.

Другие системные требования являются специфическими для каждой системы и учитывают особенности эксплуатации системы связи.

В любой реализуемой системе, выполняющей неидеальную фильтрацию, присутствует межсимвольная интерференция, которая мешает процессу детектирования. Известно, что теоретическая минимальная ширина полосы пропускания (ширина полосы частот по Найквисту), требуемая для немодулированной передачи $R_s$ символов за секунду без межсимвольной интерференции, составляет $R_s/2$ Гц. [2]. На практике минимальная ширина полосы частот по Найквисту увеличивается на 10-40% вследствие ограничений реальных фильтров. Таким образом, реальная пропускная способность цифровых систем связи снижается с 2 символа/с/Гц до 1,8-1,4 символа/с/Гц. Из набора $M$ символов, система модуляции или кодирования присваивает каждому символу $k$-битовое значение, где $M=2^{\kappa}$. Таким образом, число битов на символ можно представить как $k = log_2 M$, и, следовательно, скорость передачи данных, или скорость передачи битов $R$, должна быть в $\kappa$ раз больше скорости передачи символов $R_s$, как одно из следующего соотношения:

$$R = kR_s \text{ или } R_s = \frac{R}{k} = \frac{R}{Log_2 M} \quad (1).$$

Для системы с фиксированной скоростью передачи символов из выражения (1) видно, что с ростом $k$ увеличивается и скорость передачи битов $R$. При использовании схемы MPSK (multiple phase-shift keying – многофазная манипуляция) с увеличением $k$ повышается эффективность использования полосы частот $R/W$, измеряемая в бит/с/Гц. Например, сдвиг вдоль линии 3, из точки $e$ в точку $f$, как видно на рис. 1, *б*, представляет собой повышение $E_b/N_0$ за счет снижения требований к полосе пропускания. Это значит, что при той же полосе пропускания MPSK-модулированные сигналы можно передавать с повышенной скоростью передачи данных, а значит с увеличенным $R/W$.

К.Э. Шеннон [2] показал, что пропускная способность канала $C$ с аддитивным белым гауссовым шумом является функцией средней мощности принятого сигнала $S$, средней

мощности шума $N$ и ширины полосы пропускания $W$. Выражение для пропускной способности (теорема Шеннона-Хартли) можно записать следующим образом:

$$C = W \log_2(1 + \frac{S}{N}) \tag{2}$$

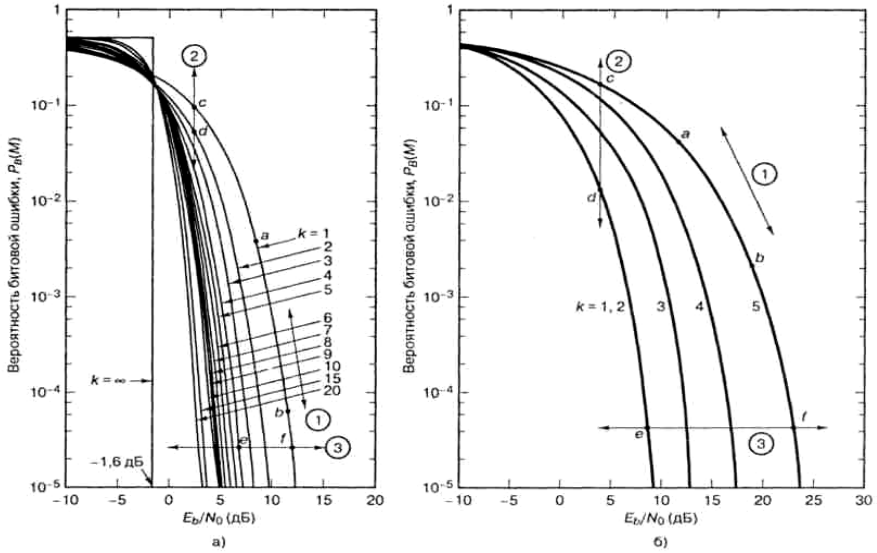



Рис. 1. Зависимость вероятности появления битовой ошибки от $E_b/N_0$ при когерентном детектировании M-арных сигналов: а) ортогональные сигналы; б) многофазные сигналы

К.Э. Шеннон [2] показал, что пропускная способность канала $C$ с аддитивным белым гауссовым шумом является функцией средней мощности принятого сигнала $S$, средней мощности шума $N$ и ширины полосы пропускания $W$. Выражение для пропускной способности (теорема Шеннона-Хартли) можно записать следующим образом:

$$C = W \log_2(1 + \frac{S}{N}) \tag{2}$$

Если $W$ измеряется в герцах, а логарифм берется по основанию 2, то пропускная способность будет иметь размерность бит/с. Теоретически, при использовании достаточно сложной схемы кодирования информацию по каналу можно передавать с любой скоростью $R$ $(R < C)$ со сколь угодно малой вероятностью возникновения ошибки. Если же $R>C$, то кода, на основе которого можно добиться сколь угодно малой вероятности возникновения ошибки, не существует. В работе Шеннона показано, что величины $S$, $N$ и $W$ устанавливают пределы скорости передачи, а не вероятности появления ошибки.

Мощность детектируемого шума пропорциональна полосе пропускания:

$$N = N_0 W. \tag{3}$$

Подставив выражение (3) в уравнение (2) и преобразовав последнее, получаем следующее:

$$\frac{C}{W} = \log_2(1 + \frac{S}{N_0 W}) \tag{4}$$

Если битовая скорость передачи равна пропускной способности канала ($R = C$), то можно записать следующее:

$$\frac{S}{N_0 W} = \frac{E_b}{N_0} \tag{5}$$

Таким образом, уравнение (4) можно модифицировать следующим образом:

$$\frac{C}{W} = \log_2[1 + \frac{E_b}{N_0}(\frac{C}{W})]$$

(6,а)

$$2^{C/W}=1+\frac{E_b}{N_0}(\frac{C}{W}) \qquad (6,б)$$

$$\frac{E_b}{N_0}=\frac{W}{C}(2^{C/W}-1) \qquad (6,в)$$

Существует нижнее предельное значение $\frac{E_b}{N_0}$ при котором ни при какой скорости передачи нельзя осуществить безошибочную передачу информации. С помощью соотношения

$$\lim_{x\to 0}(1+x)^{1/x}=e \qquad (7)$$

можно рассчитать граничное значение $\frac{E_b}{N_0}$. Пусть $x=\frac{E_b}{N_0}(\frac{C}{W})$. Тогда, из уравнения (6,а),

$$\frac{C}{W}=x\log_2(1+x)^{1/x} \text{ и } 1=\frac{E_b}{N_0}\log_2(1+x)^{1/x}.$$

В пределе, при $\frac{C}{W}\to 0$, получаем

$$\frac{E_b}{N_0}=\frac{1}{\log_2 e}=0{,}693 \qquad (8)$$

или в децибелах, $\frac{E_b}{N_0}=-1{,}6$ дБ.

Это значение $E_b/N_0$ называется пределом Шеннона. На рис. 1,а) предел Шеннона — это кривая зависимости $P_в$ от $E_b/N_0$ при $k\to\infty$. При $E_b/N_0$ =*-1,6* данная кривая скачкообразно изменяет свое значение с $P_в$=1/2 на *Рв=0.* В действительности достичь предела Шеннона невозможно, поскольку *к* возрастает неограниченно, а с ростом *к* возрастают требования к полосе пропускания и повышается сложность реализации системы.

**Вывод**

Применение более совершенных видов модуляции и кодирования информации позволяет увеличить пропускную способность цифровых каналов передачи данных.

Теоретическим доказательством существования кодов, которые могут улучшить $P_в$ или снизить требуемое значение $E_b/N_0$ от уровней некодированных двоичных схем модуляции до уровней, приближающихся к предельной кривой, является работа К.Э. Шеннона.

При вероятности появления битовой ошибки $10^{-5}$ двоичная фазовая манипуляция требует значения $E_b/N_0$, равного 9,6 дБ (оптимум некодированной двоичной модуляции). В работе Шеннона указано, что теоретически, за счет использования кодирования, производительность можно повысить на 11,2 дБ по сравнению с некодированной двоичной модуляцией. В настоящее время большую часть такого улучшения (почти 10 дБ) можно получить с помощью турбокодов. Оптимальную разработку системы можно наилучшим образом представить как поиск рациональных компромиссов среди различных ограничений и взаимно противоречивых требований. Компромиссы модуляции и кодирования, т.е. выбор конкретных схем модуляции и кодирования для наилучшего использования переданной мощности и ширины полосы, являются очень важными, поскольку имеется много причин для снижения мощности, а также существует необходимость экономии спектра радиочастот.

**Список литературы**

1. www.en.wikipedia.org

2. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.-1104с.

УДК 681.518.3:519.65

*Л.М. Щербак, д.т.н., О.О. Лещенко, ст. викладач*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ СКЛАДНИХ ПОВЕРХОНЬ ВИРОБІВ КУБІЧНИМИ СПЛАЙНАМИ

*Проаналізовано методи представлення складних поверхонь літатальних апаратів різними способами апроксимації кривих на заданій сітці. Описано метод побудови плоских кривих поліноміальним кубічним сплайном, що використовується для визначення системи кривих, на яких основана процедура математичного представлення складних поверхонь. Розглянуто основні переваги та недоліки сплайнової апроксимації, а також похибки обчислення.*

**Вступ.** Сучасні інформаційні технології виготовлення деталей з використанням математичних моделей виробів, використовує ЕВМ. Кожна конкретна інформаційна технологія свою специфіку, але загальна методологія полягає в наступному: [1]

- поверхня покривається двома уявними групами ліній; перша йде в поздовжньому напрямку, друга - трансверсальна (поперечна) до першої. Ця сітка ліній визначає множину прямокутних частин поверхні, кожна з яких, у випадку гладкої поверхні, буде обмежена чотирма гладкими кривими.
- координати вузлів цієї уявної сітки вимірюються на моделі або на кресленнях поперечних перерізів поверхонь.
- за допомогою інтерполяції математично описуються ці дві групи ліній, що утворять сітку.
- кожний прямокутник сітки тепер має чотири коректно визначені границі, і внутрішність прямокутника може бути «заповнена» за допомогою двовимірної інтерполяції.

**Постановка задачі.** Описати метод побудови поверхні виробів поліноміальним кубічним сплайном, що використовується для визначення системи плоских кривих, на яких основана процедура математичного представлення складних поверхонь. Використовуючи експериментально виміряні дискретні точки побудувати плоскі криві, за допомогою яких будується поверхня виробу..

**Розв'язання задачі.** Спочатку розглянемо класичні методи числового аналізу, до яких відносяться: апроксимація кривих за допомогою поліномів побудованих методом найменших квадратів, поліноміальна інтерполяція: метод Лагранжа та метод Ерміта, з метою порівняльного аналізу [2].

Припустимо, що нам потрібно побудувати поверхню у вигляді графіка функції: $z = z(x, y)$. Лінія $y = const$ на цій поверхні буде представлена лінією: $z = z(x)$; потрібно щоб вона проходила через набір заданих точок: $(x_0, z_0)$, $(x_1, z_1)$, ..., $(x_n, z_n)$, де $x_0 < x_1 < ... x_n$. Для $(n+1)$ точок можна записати інтерполяційний поліном Лагранжа $P_L(x)$ степені $n$, який проходить через ці точки. Однак при великому $n$ можливі небажані осциляції $P_L(x)$, які можуть мати $(n-1)$ максимумів та мінімумів. Ясно, що тенденція до осциляцій підвищується з ростом степені полінома, а значить із збільшенням числа інтерполюємих точок [3].

Один із способів усунення осциляцій – це побудова складеної кривої, в якій поліноми низької степені послідовно використовуються для інтерполяції груп точок. В результаті отримаємо кусочно-поліноміальну функцію. Якщо розглядати поліном отриманий по методу найменших квадратів, то в більшості випадків це не дає достатньої відповідності кривої заданим точкам. А збільшення степені полінома знову призведе до осциляцій.

Якщо використовувати поліноми Ерміта, то для цього повинні бути відомі величини $z'(x)$ та $z(x)$ у всіх точках. Положення точок поверхні може бути виміряно достатньо точно на моделі або на кресленнях, а точне значення градієнта виміряти складніше. Тому можемо отримати погане представлення бажаної кривої. Кусочна інтерполяція поліномами Ерміта

забезпечує неперервність перших похідних (а другі похідні будуть розривні у вузлах), не породжуючи осциляцій. Основний недолік – необхідність знання значень похідних.

Кожний із розглянутих раніше методів має хоча б один з недоліків: тенденції до осциляцій; нездатність дати гладку криву; необхідність знання похідних і вузлах.

При переході від апроксимації многочленами до апроксимації сплайнами переслідують дві цілі: перша – покращення якості наближення: похибки апроксимації сплайнами менше ніж похибки апроксимації многочленами, друга – зменшення обчислювальних труднощів при побудові алгоритмів розв'язання задач. Також апроксимацію сплайнами доцільно використовувати коли сітка недостатньо детальна, а дані виміряні експериментально.

На відрізку $[a,b]$ задамо сітку вузлів $\Delta:\ a=x_0<\cdots<x_i<\cdots x_n=b.$ Проведемо через задані точки $(x_0,z_0),\ (x_1,z_1),\ ...,(x_n,z_n)$, де $x_0<x_1<...x_n$ складену криву $\varphi(x)$, що має властивості:

– на кожному підінтервалі $x_{i-1}\le x\le x_i,\ i=1,2,...,n$ функція є кубічним поліномом;

– $\varphi(x)$ її перші та другі похідні неперервні у вузлах.

Отримана кусочно-кубічна крива називається кубічним сплайном [3]. У більшості випадків використовуються поліноміальні сплайни. Сплайни більш високих степенів отримуємо коли похідні третього та більш високих порядків неперервні у кожному вузлі. Крива, яка описана фізичним сплайном має мінімізує енергію внутрішніх з'єднань, а з точки зору математика має мінімальну середню квадратичну кривизну, вона найбільш рівна серед тих, що проходять через задані точки, як правило, задані експериментально [4].

Розглянемо побудову кубічного сплайну одної змінної $\varphi(x)$, який проходить через точки $(x_i,z_i),\ i=1,2,...,n$.

Умови побудови: $\varphi(x)$ є поліном степені $\le 3$ в кожному інтервалі $x_{i-1}\le x\le x_i$; $\varphi(x_i)=z_i;\ \varphi'(x)\ ma\ \varphi''(x)$ неперервні в точках $x_1,x_2,...,x_{n-1}$.

$x_i$ - вузли сплайнів, інтервал: $x_{i-1}\le x\le x_i$ - називається відрізком.

Розглянемо спочатку тільки один відрізок сплайна, довжина якого: $x_i-x_{i-1}=h_i$, як зображено на рис. 1. Так як $\varphi(x)$ - кубічна функція, $\varphi'(x)\ ma\ \varphi''(x)$, квадратична і лінійна, відповідно, функції від *x*. Якщо $\varphi''(x_{i-1})=s_{i-1},\ \varphi'(x_i)=s_i$ тоді $\varphi''(x)=\dfrac{s_{i-1}(x_i-x)+s_i(x-x_{i-1})}{h_i}$.

Двічі інтегруючи отримаємо: $\varphi(x)=\dfrac{s_{i-1}(x_i-x)^3+s_i\left(x-x_{i-1}\right)^3}{6h_i}+C_1x+C_2$, де сталі інтегрування можуть бути знайдені з граничних умов:

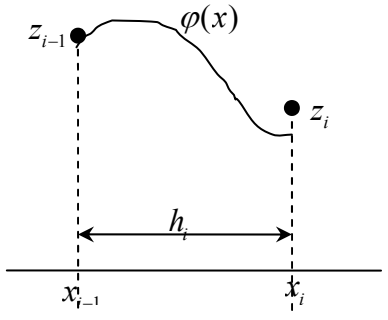



Рис.1. Відрізок сплайну одної змінної.

$\varphi(x_{i-1})=z_{i-1},\ \varphi(x_i)=z_i$. Тоді отримаємо:

$$\varphi(x)=\frac{s_{i-1}(x_i-x)^3+s_i\left(x-x_{i-1}\right)^3}{6h_i}+\left(\frac{z_{i-1}}{h_i}-\frac{s_{i-1}h_i}{6}\right)(x_i-x)+\left(\frac{z_i}{h_i}-\frac{s_ih_i}{6}\right)(x-x_{i-1}) \quad (1)$$

Це інтерполююча кубічна функція на відрізку $x_{i-1}\le x\le x_i$, виражена через дві відомі величини $z_{i-1},\ z_i$, та дві невідомі величини - $s_{i-1},\ s_i$.

Щоб визначити величини $s_{i-1},\ s_i$ використаємо властивість неперервності першої похідної у вузлах сплайна. Диференціюючи (1) по *x* і взявши, що $x=x_i$ знайдемо:

$$\varphi'(x_i) = \frac{z_i - z_{i-1}}{h_i} + \frac{s_i h_i}{3} + \frac{s_{i-1} h_i}{6} \qquad (2)$$

Тепер замінимо *i* на *i+1* в (2) отримаємо кубічну інтерполюючу функцію на наступному відрізку $x_i \le x \le x_{x+1}$. Диференціюємо її і взявши $x = x_i$ отримаємо:

$$\varphi'(x_i) = \frac{z_{i+1} - z_i}{h_{i+1}} - \frac{s_i h_{+1i}}{3} - \frac{s_{i+1} h_{i+1}}{6} \qquad (3)$$

де $h_{i-1} = x_{i+1} - x_i$. Так як $\varphi'(x)$ повинна бути неперервна при $x = x_i$ тому праві частини (2) і (3) повинні бути рівні. Це дає рівняння:

$$h_i s_{i-1} + 2(h_i + h_{i+1}) s_i + h_{i+1} s_{i+1} = \frac{6(z_{i+1} - z_i)}{h_{i+1}} - \frac{6(z_i - z_{z-1})}{h_i}, \qquad (4)$$

Яке лінійне відносно трьох невідомих: $s_{i-1}, s_i, s_{i+1}$. Можна записати рівняння такого типу для кожного $(n-1)$ внутрішніх вузлів: $x_1, x_2, ..., x_{n-1}$. Для визначення $(n+1)$ значень s, треба дві додаткових умови. Умови можуть бути такі:

– вільні кінцеві точки: нульова кривизна сплайна в $x_0$ та $x_n$, тобто $s_0 = s_n = 0$;

– включені кінцеві точки: визначені перші похідні в $x_0$ та $x_n$.

– квадратичні кінцеві відрізки: так як квадратична функція має постійну другу похідну, то граничні умови будуть такі - $s_0 = s_1$ і $s_{n-1} = s_n$.

Розрахуємо сплайн для випадку *n=4* з граничними умовами: одна кінцева точка вільна : $s_0 = 0$, а інша кінцева точка з заданою похідною $g_4$ рис.2. Рівняння для невідомих других похідних записані в матричній формі, мають вигляд (5).

$$\begin{bmatrix} 2(h_1+h_2) & h_2 & & \\ h_2 & 2(h_2+h_3) & h_3 & \\ & h_3 & 2(h_3+h_4) & h_4 \\ & & h_4 & 2h_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} = 6 \begin{bmatrix} \frac{1}{h_1} z_0 - \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2}\right) z_1 + \frac{1}{h_2} z_2 \\ \frac{1}{h_2} z_1 - \left(\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_3}\right) z_2 + \frac{1}{h_3} z_3 \\ \frac{1}{h_3} z_2 - \left(\frac{1}{h_3} + \frac{1}{h_4}\right) z_3 + \frac{1}{h_4} z_4 \\ g_4 + \frac{1}{h_4} z_3 - \frac{1}{h_4} z_4 \end{bmatrix} \qquad (5)$$

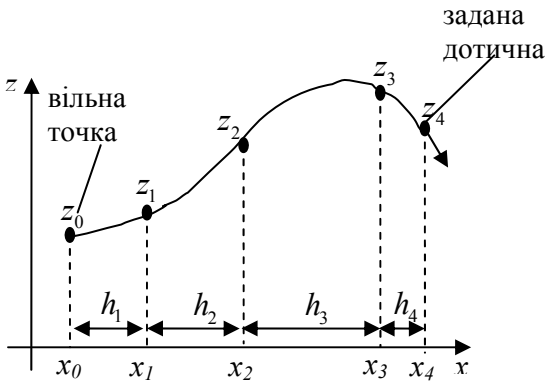



Рис. 2. Розрахунок кубічного сплайну

Матриця коефіцієнтів цієї системи є трьохдігональною і розв'язується методом прогонки. Коли всі невідомі обчислені, за формулою (1) отримуємо кубічну функцію для кожного індивідуального відрізка сплайна.

Похибкою апроксимації сплайнами називають відстань між наближаючим многочленом та апроксимуємою функцією. Якщо позначити через $R_n(x) = P_n(x) - \varphi(x)$ остаточний член апроксимації, то похибка буде $\|R_n(x)\|$. Ця величина залежить від степені мночлена та від кроків $h_i$ сітки $\Delta$. Зменшення кроку призводить до збільшення кількості вузлів. У випадку многочленів це пов'язано із зростанням їх степеня, але степінь сплайнів не змінюється.

Візьмемо дані виміряні експериментально представлені в табл. 1, при $y = const$.

Експерементальні дані *Табл. 1*

| | $x_i$ | $z_i$ | $h_i$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0,2465 | 0,2447 | - |
| 1 | 0,6510 | 0,6024 | 0,4054 |
| 2 | 1,1512 | 0,9187 | 0,5000 |
| 3 | 1,9304 | 0,9381 | 0,7792 |
| 4 | 2,4873 | 0,6124 | 0,5573 |

Згідно формулі (5) отримаємо:

$$\begin{bmatrix} 1.8124 & 0.5023 & 0 & 0 \\ 0.5023 & 2.5580 & 0.7792 & 0 \\ 0 & 0.7792 & 2.6721 & 0.5572 \\ 0 & 0 & 0.5573 & 1.1146 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.2497 \\ -0.6073 \\ -0.6102 \\ -0.2086 \end{bmatrix}$$

Записавши цей вираз у вигляді системи чотирьох рівнянь, знайдемо коефіцієнти $s_1, s_2, s_3, s_4$. Систему можна розв'язати матричним способом або методом Крамера [4]. Підставивши коефіцієнти $s_1, s_2, s_3, s_4$ в формулу (1) отримаємо інтерполюючу кубічну функцію для кожного з відрізків. Отримана експериментально крива зображена на рис.3.

$$\varphi_1(x) = -4.5691(x - 0.651)^3 + 0.7509x + 0.0597$$

$$\varphi_2(x) = -3.7(1.151 - x)^3 - 1.9326(x - 0.651)^3 - 0.2415x - 1.2442$$

$$\varphi_3(x) = -1.2401(1.93 - x)^3 - 1.3779(x - 1.151)^3 + 0.1086x + 1.3799$$

$$\varphi_4(x) = -1.9265(2.487 - x)^3 - 2.7301(x - 1.93)^3 + 1.1917 - 4.2284$$

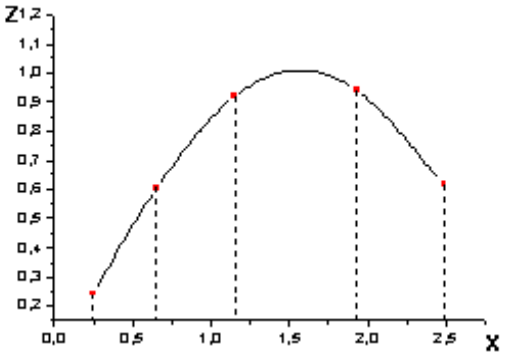



Рис. 3. Експериментально отримана крива

Перевага їх полягає в досягненні неперервності других похідних (так що кривизна неперервна). Однак вони мають і обмеження: локальні зміни ведуть за собою обчислення заново всього сплайну; розглянений сплайн не використовується для апроксимації кривих з вертикальними дотичними; можуть виникати осциляції при апроксимації кривих, що мають розриви других похідних. Перше обмеження можна усунути використовуючи B-сплайни, друге можна подолати, а третє ослабити використанням параметричних сплайнів.

## Висновок

Обґрунтовано використання сплайнів для описання складних геометричних форм. Визначено, що сплайни мають три важливих переваги: по-перше, кращими апроксиативними властивостями ніж класичні методи числового аналізу, що при рівних інформаційних затратах дає більшу точність; по-друге, простоту реалізації отриманих на їх основі алгоритмів для ЕВМ, по-третє, - універсальність, що дозволяє використовувати одні і тіж апроксимуючі конструкції для різних геометричних об'єктів. Проаналізовано, що поліноміальні кубічні сплайни можуть бути використані для побудови кривих опису поверхні складних геометричних виробів.

## Список літератури


1. *Фокс А., Пратт М.* Вычислительная геометрия. – М.: Мир, 1982. – 420 с.
2. *Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж.* Теория сплайнов и ее приложения.-М.: Мир, 1972.– 318с.
3. *Завьялов Ю. С.,* Сплайны в инженерной геометрии/ Ю. С. Завьялов, В. А. Леус, В. А. Скороспелов. – М.: Машиностроение, 1985. – 224с., ил.
4. *Калиткин Н Н.*. Численные методы . Учебное пособие. - М.: Наука, 1978. - 512 с.

УДК: 531.7

*М.А. Тимофієва, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# СИСТЕМИ НЕЧІТКИХ МНОЖИН ПРИ ВИМІРЮВАННІ

*У статті розглянуто особливості реалізації системи управління вимірювальним процесом координатно - вимірювальної машини. Задача управління вирішується шляхом використанням апарату нечіткої логіки. Запропоновано алгоритм, що дозволяє виконувати операцію дефазифікації стосовно будь-яких мікроконтролерів систем управління.*

Математична теорія нечітких множин дозволяє описувати неточні категорії, представлення і знання, оперувати ними і робити відповідні нечіткі висновки. Нечітке керування виявляється особливо корисним, коли технологічні процеси є дуже складними для аналізу за допомогою загальноприйнятих кількісних методів або доступні джерела інформації інтерпретуються якісно, неточно чи невизначено. Нечітка логіка забезпечує ефективні засоби відображення невизначеностей і неточностей реального миру. Наявність математичних засобів відображення нечіткості початкової інформації дозволяє побудувати модель, яка адекватна реальності [1].

Використання природної мови з усім набором засобів для вираження людських способів міркувань і прийняття рішень за допомогою якісних представлень, понять і оцінок типу «дуже мало», «мало», «середньо», «достатньо» дозволяє всесторонньо і компактно описати загальну смислову постановку задач управління вимірювальним процесом.

Логіко-лінгвістичні моделі, які отримані в результаті інтерпретації цих описів у термінах теорії нечітких множин, можуть бути основою для розробки алгоритмів і систем інтелектуального управління складними об’єктами, які діють в умові неповної інформації [2].

Ефективність логіко – лінгвістичних моделей управління визначається двома основними факторами: вибором терм – множин, які використовуються для опису взаємозв’язків параметрів моделей, що синтезуються; побудовою функції належності окремих термів. Розмірність терм-множин лінгвістичних змінних, а також форма і відносне розташування відповідних функцій належності по базових осях суттєво впливають на характер перетворення між вхідними і вихідними параметрами нечіткої моделі управління.

Процес нечіткого управління вимірювальним процесом можна розбити на декілька кроків: фазифікація або перехід до нечіткості, використання нечітких продукційних правил, дефазифікація або усунення нечіткості [3]. При реалізації пристроїв управління, які використовують апарат нечіткої логіки, можливе використання спеціальних мікроконтролерів, що здатні виконувати нечіткі команди. Проте такі мікроконтролери і їх засоби розробки досить специфічні, тому представляє інтерес реалізація нечітких систем управління на звичайних мікроконтролерах поширених серій. Але при цьому необхідно вирішити ряд проблем, які пов’язані з виконанням операції фазифікації і дефазифікації. Як показав досвід проектування, при використанні стандартних функцій належності фазифікація вхідних змінних доволі проста процедура. Використання при програмуванні мікроконтролерів мов високого рівня дозволяє легко реалізувати роботу з нечіткими правилами. Для того, щоб пристрій виконання зміг відпрацювати команду, яка є результатом обробки нечітких правил, потрібен етап дефазифікації, на якому позбавляються від нечіткості.

Для усунення нечіткості кінцевого результату існує декілька методів [4, 5]: центр тяжіння (Centroid), медіана (Bisector), найбільший із максимумів (LOM), найменший із максимумів (SOM), центр максимумів (Mom). Найбільш застосовним методом дефазифікації є обчислення абсциси центра тяжіння фігури об’єднаних усічених множин для кожного із нечітких правил. Центр тяжіння фігури находиться за наступною формулою:

$$\psi = \frac{\sum S_i \cdot \psi_i}{\sum S_i}, \qquad (1)$$

де $S_i$ - площа $i$ - ї елементарної фігури, $\psi_i$ - значення центра тяжіння $i$ - ї елементарної фігури.

Елементарна фігура може мати вигляд трапеції чи прямокутника. Для розрахунку центра тяжіння об'єднаних усічені множин при виконанні операції дефазифікації розроблено оригінальний алгоритм, який дозволяє розбивати ці множини на елементарні фігури та розраховувати координати центрів тяжіння цих фігур.

Нехай є система нечіткого управління вимірювальним наконечником координатно-вимірювальної машини. Модель нечітких розрахунків може бути представлена у вигляді наступної схеми (рис. 1).

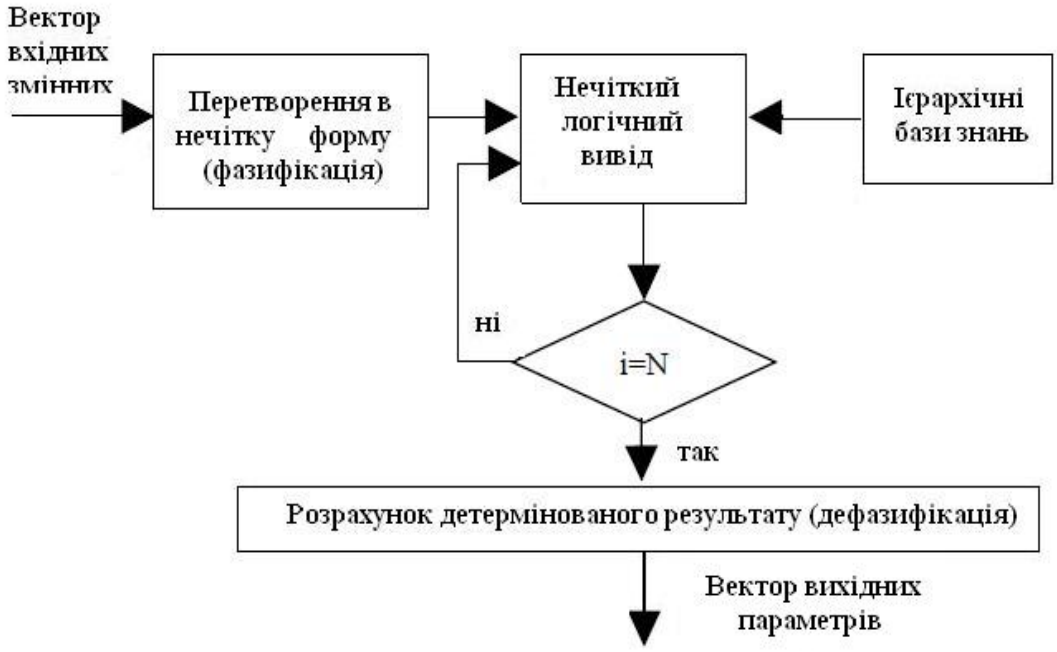



Рис. 1. Модель нечітких розрахунків

Введемо вихідну нечітку змінну $\varphi$ – продуктивність процесу. На рис. 1 показана можлива функція належності цієї змінної.

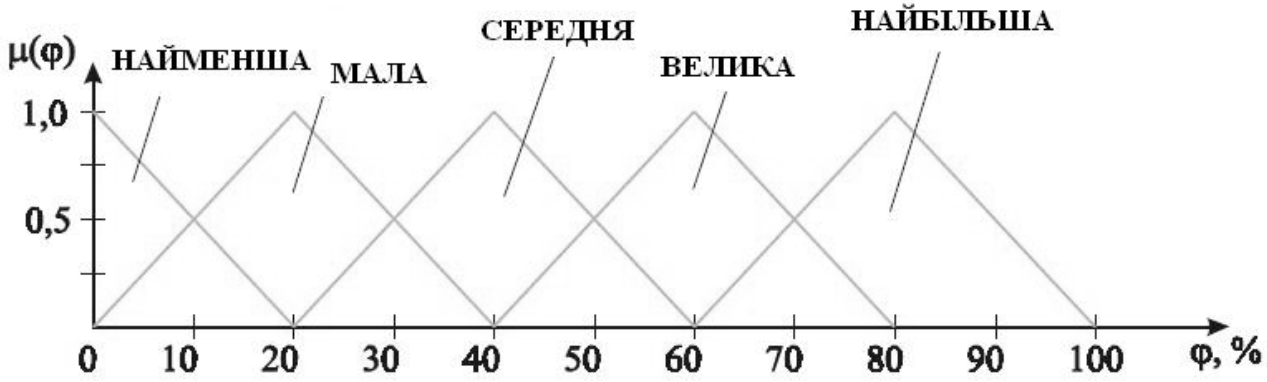



Рис. 2. Фрагмент функції належності продуктивності процесу вимірювання

Із рисунку 2 видно, що нечітка змінна $\varphi$ визначена п'ятьма термами: НАЙМЕНША, МАЛА, СЕРЕДНЯ, ВЕЛИКА, НАЙБІЛЬША.

Розглянемо фрагмент функції належності вихідної змінної $\varphi$ на інтервалі 0…20% (рис. 3).

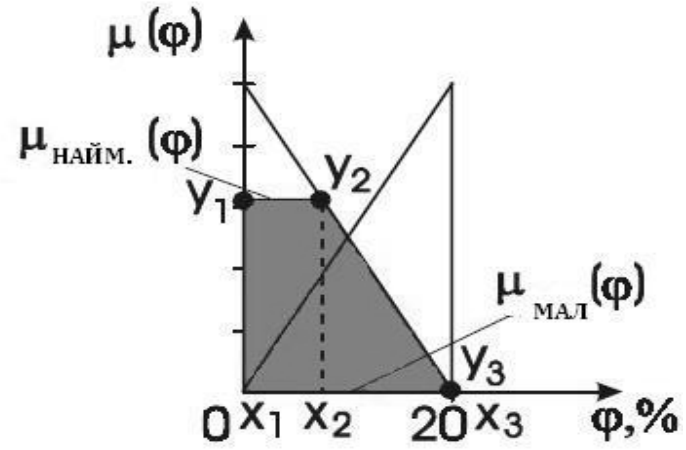



Рис. 3. Функція належності цієї змінної

Введемо два характерних рівня – степені належності змінної $\varphi$ термам НАЙМЕНША, МАЛА. Дані рівні є результатом обробки сукупності нечітких правил. Проаналізував ці рівні, можна зробити висновки про кількість вершин ломаної, яка обмежує зверху частину об'єднаної усіченої множини. Визначимо координати цих вершин. Перша вершина буде мати координати $x_1 = 0,\ \ y_1 = \mu_{найм.}(\varphi)$, де під координатою $x$ розуміємо значення кута повороту, $y$ - величина степені належності. Друга вершина буде знаходитися на границі терму НАЙМЕНША, причому $y_2 = y_1$ і координата $x_2$ визначається нахилом границі терму. Для вершини $x_3 = 20,\ \ y_3 = \mu_{мал}(\varphi) = 0.$

Якщо перейти до наступного фрагменту функції належності вихідної змінної $\varphi$ в інтервалі 20…40%, можна визначити координати наступних вершин. Усього повинно бути розглянуто п'ять фрагментів (по кількістю термів у даному прикладі). Кількість вершин ломаної заздалегідь визначити неможливо.

На рис. 4 показані об'єднані усічені множини для вихідної лінгвістичної змінної $\varphi$ з відміченими вершинами ломаних (характерні точки).

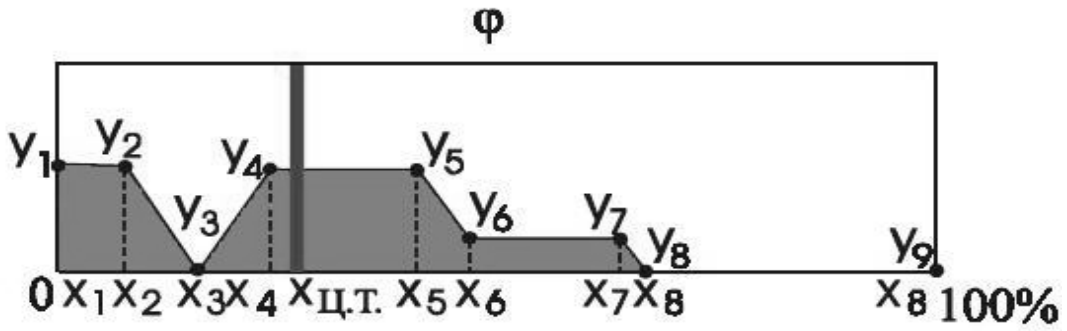



Рис. 4. Об'єднані усічені множини для вихідної лінгвістичної змінної $\varphi$

Характерні точки визначають елементарні фігури, на які розпадаються об'єднані усічені множини при визначені центрів тяжіння по формулі (1).

Формула (1) може бути перетворена до вигляду (2), який дозволяє розраховувати координату центра тяжіння об'єднаної усіченої множини по координатам характерних точок:

$$x_{ЦТ}^{\sum} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} y_i (x_{i+1}^2 - x_i^2)}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i)} -$$

$$- \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{4} x_i (x_{i+1} + x_i)(y_{i+1} - y_i)}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i)} + \qquad (2)$$

$$+ \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{6} \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} + x_i} (x_{i+1}^3 - x_i^3)}{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i)},$$

де $x_i, y_i$, – координати характерних точок, які визначають границі елементарних фігур.

Коректність формули (2) і усього алгоритму дефазифікації провірена зрівняльними розрахунками: розходження значень продуктивності вимірювання $\varphi$, які розраховані в середовищі Matlab [4, 5], за розробленим алгоритмом при однакових значеннях вхідних змінних не перевищують 1%.

## Висновки

Використання апарату нечіткої логіки дозволяє інакше вирішувати задачі вимірювання координатно-вимірювальної машини – без залучення класичних методів теорії автоматичного управління. Практична реалізація нечіткого управління в системах управління зі «звичайними» мікроконтролерами потребує розробки спеціальних алгоритмів. Запропонований у статті алгоритм дозволяє виконувати операцію дефазифікації стосовно будь-яких мікроконтролерів систем управління вимірювальними процесами.

## Список літератури


1. *К. Асаи, Д. Вадата, С.Ваи.* Прикладные нечеткие системы. М.:Мир, 1993. – 368с.
2. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений / Л. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. *Д. А. Подоспелова*. – М.: Наука, 1986. – 312 с.
4. *Леоненков А.В.* Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. — СПб.: БХВ–Петербург, 2003. - 736 с.
5. *Штовба С.Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / Штовба С.Д. – М: Телеком, 2007. -288 с.

УДК: 621.822.:629.7.03 (043.2)

*Ю.В. Гусєв, головний технолог (ДП МО України «ЛРЗ Мотор», Україна),*
*О.В. Дергунов, А.М. Пирог, А.А. Рижкова*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ПІДШИПНИКОВИХ ВУЗЛІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

*У публікації розглянута методика визначення вібраційних параметрів роботи підшипникових вузлів в динамічних режимах за допомогою вимірювальних систем для контактного або безконтактного контролю механічного стану елементів машин.*

Діагностика стану машин та оцінка ступеня небезпеки пошкодження на основі даних контролю вібрації – один з найбільш ефективних методів підвищення надійності устаткування.

Вібраційна діагностика об`єктів проводиться в три етапи: первинний опис вібраційного стану об`єкту, виділення ознак та прийняття рішенн.

На етапі пошуку інформативних ознак обмежують кількість вібрації, шуму та ударів. При цьому з множини параметрів, характеризуючих вібраційний процес, виділяють тільки ті, які прямо або опосередковано характеризують стан об`єкту. По цим параметрамформують інформаційну систему ознак, яку використовують при діагностиці.

Табл. 1 - Основні параметри вібраційних процесів.

| Основні вимірювані параметри | Математичний опис | Позначення |
|---|---|---|
| Моногармонічна вібрація | | |
| Вібропереміщення | $x(t) = X_0 \sin(\omega t + \varphi)$ | $X_0$ - амплітуда вібропереміщення |
| Віброшвидкість | $\nu(t) = V_0 \cos(\omega t + \varphi)$ | $V_0 = \omega X_0$ |
| Віброприскорення | $a(t) = -A_0 \sin(\omega t + \varphi)$ | $A_0 = \omega^2 X_0$; $\omega, \varphi$ - колова частота та фаза коливання відповідно |
| Різкість | U=da(t)/dt | |

Визначення вібраційних параметрів роботи підшипникових вузлів, а також динаміки їх зміни в часі є актуальною проблемою в діагностиці елементів машин і механізмів, а також в прогнозуванні їхнього ресурсу. Особливого значення ця задача набуває в авіації при визначенні стану авіаційних двигунів та придатності їх до безпечної роботи.

У даній публікації розглянута методика визначення радіального переміщення, швидкості і прискорення внутрішнього кільця підшипника щодо зовнішнього (або навпаки) в динамічних режимах роботи за допомогою програмно-апаратного вимірювального комплексу для безконтактного контролю механічного стану елементів машин. Слід зазначити, що дана методика може бути використана і для інших безконтактних вимірювальних систем, реалізованих на основі вихретокових, оптичних або інших типів

вимірювальних датчиків, що дозволяють визначати відстань до контрольованої поверхні. Методика також може бути застосована і для контактних вимірювальних систем.

При вимірюванні зазору між датчиком і контрольованою поверхнею, що обертається, в динамічних режимах масив результатів дискретних вимірювань несе в собі як інформацію про реальний профіль контрольованої поверхні, так і інформацію про вібрації самого об'єкту вимірювань (валу, колектора і т. п.) унаслідок наявності механічної неідентичності положення валу в підшипникових вузлах від обороту до обороту. Розділення вихідного масиву вимірювань на реальний профіль контрольованої поверхні і вібрації в підшипникових вузлах є достатньо складним інженерним завданням. Дане завдання може бути вирішена за допомогою нового методу вимірювань. Із застосуванням даного методу стає можливим виділення профілю контрольованій поверхні $y_{вид}$ з початкового масиву результатів вимірювань $y_{поч}$.

Профілі, що описують вібрації об'єкту вимірювань в підшипникових вузлах $y_{подш}$ можуть бути отримані шляхом віднімання виділеного профілю колектора $y_{вид}$ з кривих, складаючих первинний масив вимірювань $y_{поч}$:

$$y_{подш.i}=y_{поч.i}-y_{вид.i}. \quad (1)$$

Таким чином можна отримати масив кривих, що описують підшипникові вібрації. Якщо детально розглянути кожну криву даного масиву в відокремлено, то можна зробити висновок, що деякі з них зростають, а інші спадають. Тому просте усереднювання кривих для визначення середніх параметрів роботи підшипникового вузла неможливе, оскільки результатом буде близьке до нуля значення. Автором була запропонована методика, першим кроком якої є розділення результатів дискретних вимірювань підшипникових вібрацій на два масиви, у які увійдуть лише зростаючі і лише спадаючі профілі.

Далі необхідно для кожного із зростаючих і спадаючих профілів окремо провести наступні дії: виконати гармонійний аналіз; знайти значення вібропереміщень, віброшвидкості і віброприскорення внутрішнього кільця підшипника в межах розгортки вібрацій за оборот; знайти середнє значення для кожного з параметрів.

В ході проведених досліджень було виявлено, що отримані вищезазначеним способом середні значення вібропереміщень, віброшвидкості і віброприскорення внутрішнього кільця підшипника повністю збігаються з аналогічними значеннями, отриманими із заздалегідь усереднених зростаючих і спадаючих профілів окремо. Таким чином, можна значно скоротити машинний час, якщо спочатку знайти середній профіль для масиву, що містить зростаючі профілі, а вже потім проводити аналіз цього профілю. Аналогічно поступають і з масивом, спадаючих профілів.

При цьому наступним етапом буде гармонійний аналіз і знаходження значень віброшвидкості і віброприскорення внутрішнього кільця підшипника на основі усереднених вібропереміщень якоря. Для цього спочатку необхідно розкласти середній зростаючий (спадаючий) профіль підшипникових вібрацій в ряд Фур`є - на гармонійні складові. Проте, зростаючий (спадаючий) профіль при періодичному повторенні має пилкоподібну форму, унаслідок чого при розкладанні в ряд Фур`є виникає ефект Гіббса. Вказаний ефект завжди має місце при різких порушеннях монотонності функції. На скачках ефект максимальний, у всіх інших випадках амплітуда пульсацій залежить від характеру порушення монотонності функції. Тому, при знаходженні прискорень підшипникових вібрацій для зростаючого (спадаючого) профілю на краях спостерігається різке збільшення амплітуди, мал. 1. Вказані сплески достатньо сильно спотворюють реальне значення віброприскорення.

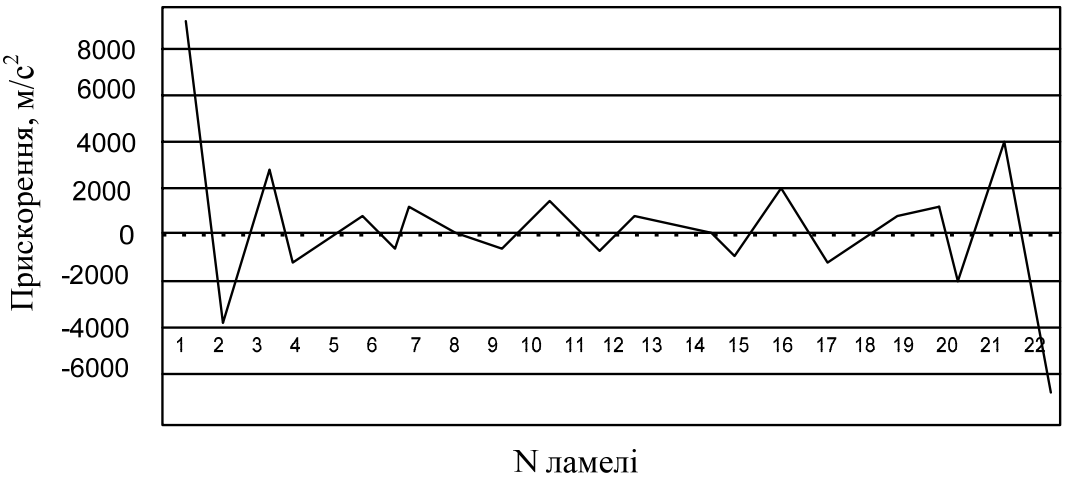



Рис.1. Віброприскорення з необробленого профілю підшипникових вібрацій

Уникнути цього небажаного ефекту, а значить підвищити достовірність результатів, допомагає метод, запропонований Корнелієм Ланцошем [3]. Для цього необхідно виконати перетворення профілю так, щоб значення висоти першого вимірювання збігалося із значенням висоти останнього вимірювання, тобто виконувалася умова:

$$y_1 = y_k, \tag{2}$$

Для виконання умови (2) необхідно наступне перетворення:

$$y_{пов} = y_i - y_1 - (y_k - y_1)\frac{i-1}{k-1} \tag{3}$$

де $y_{пов}$ – повернутий до вісі профіль;

$i=1 \div (k-1)$, $k$ – кількість вимірювань за один оберт.

З експериментальних даних відомо, що повернений до осі профіль вібропереміщень часто несиметричний вісі OX, отже, значення обчислених віброприскорень з позитивним і негативними знаками можуть відрізнятися. Уникнути цього допоможе додавання до поверненого профілю дзеркально відбитого профілю, отриманого згідно виразу:

$$y_{k+n}^{дзер} = -y_{k-n}^{пов}, \tag{4}$$

де $n=1 \div (k-1)$, $k$ – кількість вимірювань за один оберт.

Далі слідує завершальний етап – отримання обробленого профілю шляхом об`єднання повернутого до вісі та дзеркального профілів.

Таким чином, отриманий перетворений профіль, що не має розривів 1 -го роду і вільний від впливу ефекту Гіббса, а значить і отримані згодом величини віброприскорень є достовірнішими, рис. 2.

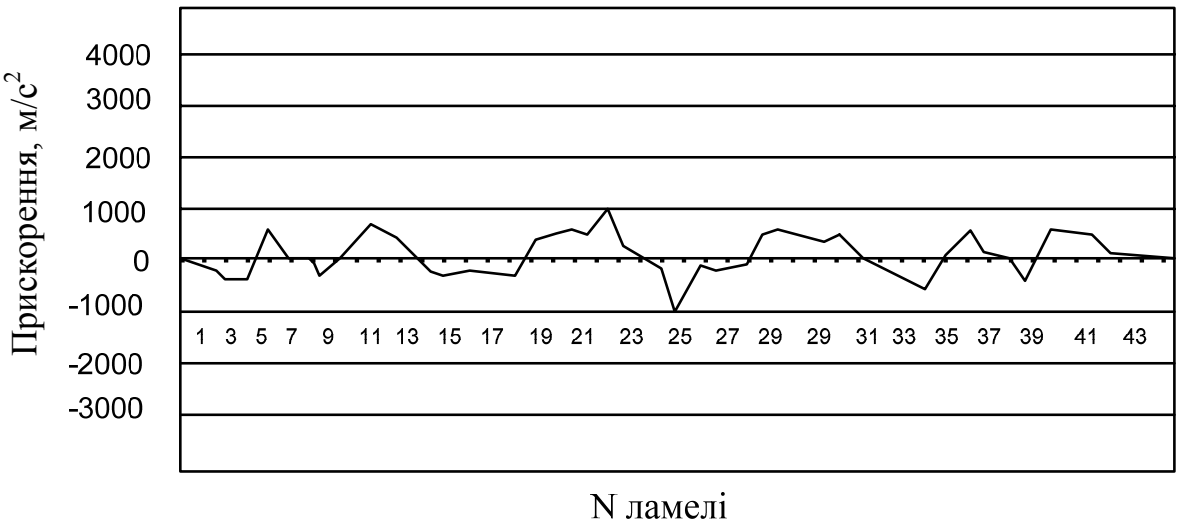



Рис. 2. Виброприскорення з обробленого профілю підшипникових вібрацій

## Висновки

На основі запропонованої методики можливе визначення миттєвих значень віброприскорень впродовж одного обороту об'єкту вимірювання, а також середніх значень віброприскорень, величини яких необхідні для оцінки стійкості роботи ковзаючого контакту щітка-колектор, а також для прогнозування ресурсу роботи КЩУ із застосуванням спеціального програмного продукту.

## Список літератури

1. *Ланцош К.* Практические методы прикладного анализа. - М.: Физматшз, 1961. - 524 с.

2. Вибрации в технике: Справочник в 6 т. Том I / Под ред. *В.Н. Челомея.* М.: Машиностроение, 1978. 352 с.

3. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / *М.Д. Генкин*, А.Г. Соколова. М.:Машиностроение, 1987. 365 с.

4. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник. В 2 кн. / Под ред. *В.В. Клюева.* М.: Машиностроение, 1978. 448 с.

УДК: 004.052

*Є.Я. Ваврук, к.т.н., І.В. Грицик, аспірант*
*(Національний університет «Львівська політехніка», Україна)*

# АЛГОРИТМ ОРГАНІЗАЦІЇ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ СИСТЕМИ ОПРАЦЮВАННЯ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ РЕКОНФІГУРАЦІЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ

*Розглянута організація відмовостійкості систем опрацювання шляхом реконфігурації обчислювальних ресурсів. Розроблено алгоритм роботи для систем на базі ПЛІС з вбудованими компонентами опрацювання сигналів. Визначено ключові аспекти застосування даного підходу в реальних системах.*

З погляду відновлення працездатності, поняття відмовостійкості можна визначити як здатність обчислювальної системи підтримувати працездатнісь при наявності різних типів відмов, яка досягається шляхом забезпечення обчислювального процесу справними елементами.

Відомо[1,2], що відмовостійкість досягається введенням різного типу надлишковості; а для систем опрацювання сигналів, здебільшого,- апаратна надлишковість, яка базується на застосуванні [3]:

- потрійної модульності із мажоритарним вибором результату;
- потрійної модульністі із потроєним мажоритарним вибором результату;
- дублюванні модулів із схемою виявлення помилок;
- реконфігурованих структурах.

Забезпечення відмовостійкості на основі реконфігурованих структур дозволяє виявляти збої і відмови в несправних компонентах обчислювальної системи із наступною заміної їх на справні. Даний підхід найкраще реалізовувати на програмованих логічних інтегральних схемах( ПЛІС), внутрішня структура яких орієнтована на можливість повної реконфігурації обчислень..

На рис.1 наведена структурна схема реконфігурованого обчислюваьного вузла СОС на базі ПЛІС [4].

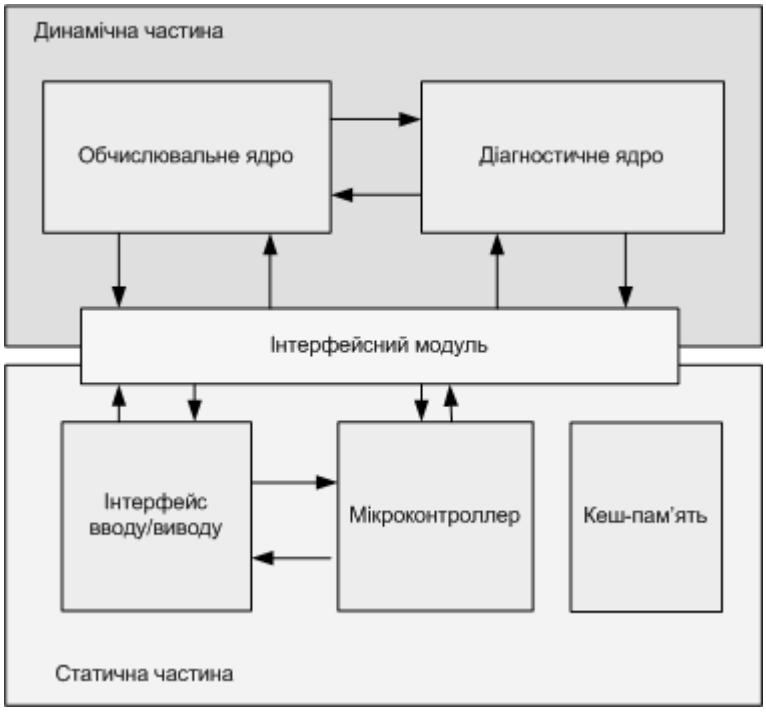



Рис. 1. Структурна схема реконфігурованого обчислювального елемента на базі ПЛІС

Обчислювальний вузол на ділиться на дві частини:статичну і динамічну.

До складу статичної частини входить мікроконтроллер, який керує процесом обчислення та процесом реконфігурації динамічної частини. Інтерфейс вводу/виводу призначений для обміну інформацією з іншими периферійними пристроями та для звязку з іншими вузлами системи .

Динамічна частина містить обчислювальне ядро, до складу якого входять апаратні засоби обробки сигналів. Результати обчислювального елемента контролюються діагностичним ядром. В залежності від конфігурації обчислювального ядра структура діагностичного ядра також буде змінюватись.

Інтерфейсний модуль призначений для взаємодії динамічної і статичної частин ПЛІС. Як мікроконтроллер може використовуватись процесор Microblaze, Picoblaze. Кеш-пам'ять призначена для збереження проміжних даних.

Алгоритм роботи запропонованого підходу можна пояснити на основі робочої схеми, що наведена на рис.2-3. Під час обчислень (див рис.2) вузол контролю і діагностики веде спостереження за ходом обчислень, і у разі виявлення помилки відбувається запуск механізмів діагностування. На основі отриманої інформації мікроконтроллер здійснює реконфігурацію обчислювального і діагностичного ядра і процес обчислення продовжується. Мікроконтроллер та вузол реконфігурації не задіяні, оскільки, вони використовуються у разі появи відмови і забезпечують контроль над процесом реконфігурації динамічної частини.

Після запуску системи формується список пар використаних обчислювальних комірок та прикріплених до них компонентів діагностики. Вільні обчислювальні комірки реєструються в списку вільних комірок.

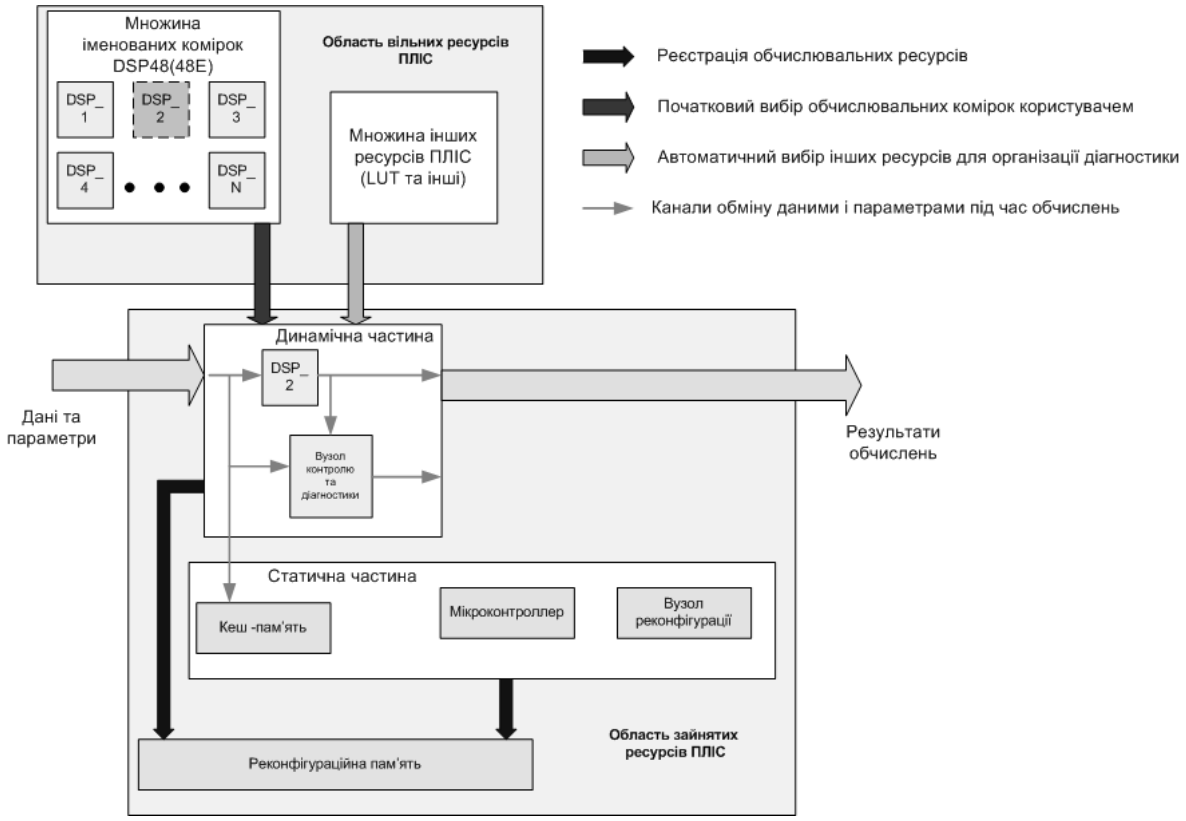



Рис. 2 Схема функціонування при відсутності відмов

У разі винекнення збою вузол реконфігурації, згідно керуючих сигналів мікроконтроллера, виконує конфігурацію динамічної частини.

Інформація про конфігурацію динамічної та статичної частини записується у конфігураційну пам'ять. При поступлення вхідних даних виконується обчислення згідно алгоритму обчислень.

На рис. 3 наведена схема функціонування при виявленні відмови. Нумеровані стрілки вказують послідовність дій, які повинна виконати система при відмові або збої.

1. ДЯ виявило невідповідність між вхідними даними та результатом обчислень та передало інформацію про імя комірки яка вийшла з ладу мікроконтроллеру .

2. Мікроконтроллер відключає доступ до кеш памяті зі збережиними даними та здійснює читання з реконфігураційної памяті і аналізуючи її вміст знаходить конфігураційні біти яким відповідає комірка яка вийшла з ладу.

3. Мікроконтроллер подає опрацьовану інформацію для реконфігурації динамічної частини вузлу реконфігурації .

4. Вузол здійснює швидку реконфігурацію динамічної частини. При цьому комірка яка вийшла з ладу заноситься в список несправних комірок, а на її місце підключається справна комірка з множини вільних комірок та новий вузол діагностики та контролю. Для збереження ресурсів можна ввести фонову діагностику комірки з можливістю відновлення її працездатності і переведення у множину вільних(справних комірок). Комірка яка не підлягає відновленню заноситься в список «мертвих комірок».

5. Після реконфігурації мікроконтроллер відкриває доступ до проміжних даних і ці данізнову поступають на вхід обчислювальної комірки і виконання залгоритму обчислень продовжується далі.

6. Після відкриття доступу до кеш пам’яті інформація про нову конфігурацію динамічної частини записується в реконфігураційну пам'ять.

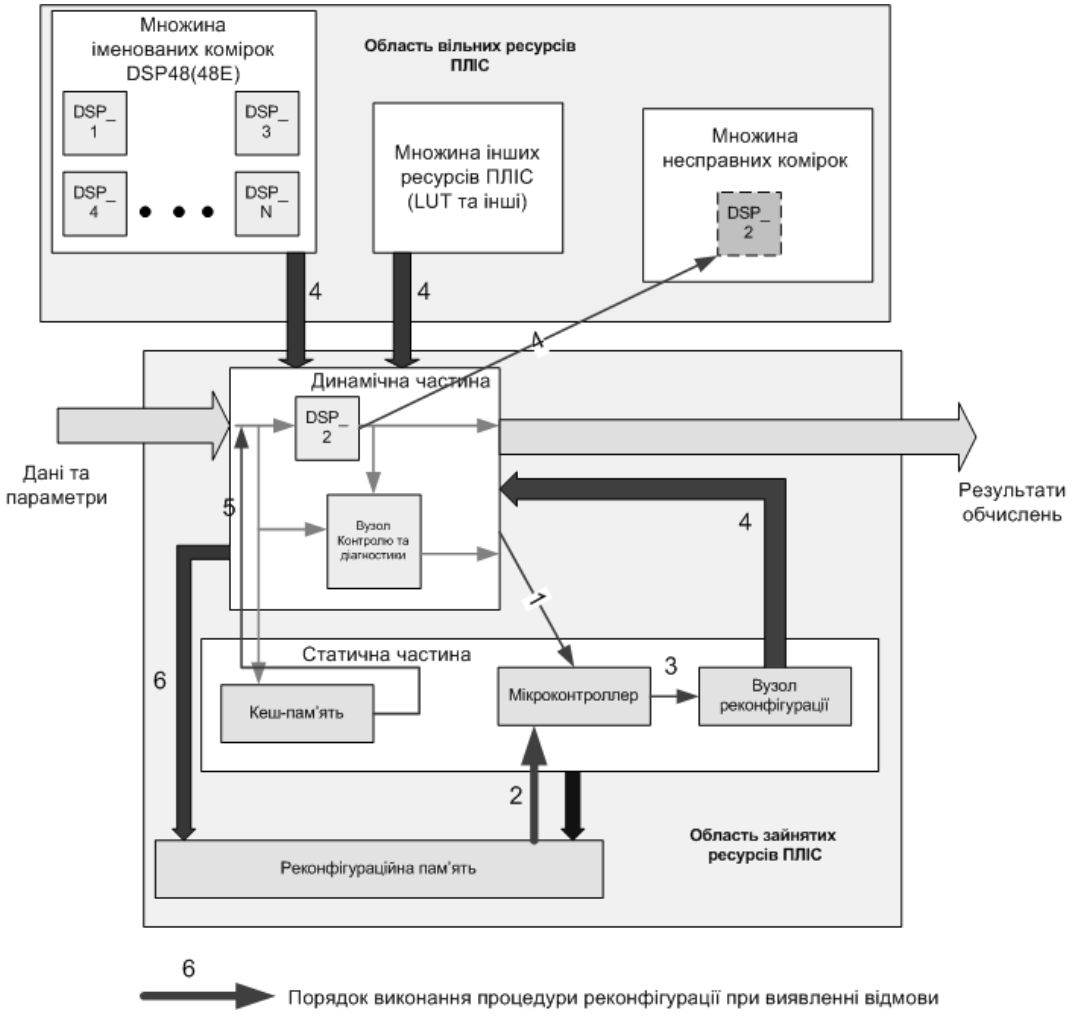



Рис.3. Схема функціонування при виявленні відмови

Місце несправності виявляється схемою діагностування обчислювального елемента. На рис. 4 наведено схему організації діагностування обчислювальної комірки DSP48(48E), яка входить до складу ПЛІС Virtex4/5. На вхід комірки поступають дані та параметри вибору режиму функціонування. Ці дані також поступають на вузол контролю та діагностики, який, аналізуючи взаємозв'язок вхідних даних з результатами обчислень визначає їх відповідність одне одному. У разі виявлення невідповідності, можна за станом інформації про режим обчислення визначити тип та місце помилки, і тим самим перебудувати обчислення із збереженням проміжних результатів. Вхідні дані та основні параметри записуються в кеш-пам'ять. У разі відсутності відмови (комірка спрацювала правильно) пам'ять очищується і процес починається знову. При виникненні відмови пам'ять зі збережиними даними "відключається" від обчислювального вузла. Після реконфігурації останнього, пам'ять підєднується і збережені дані знову поступають на вхід комірки, і процес обчислення відновлюється.

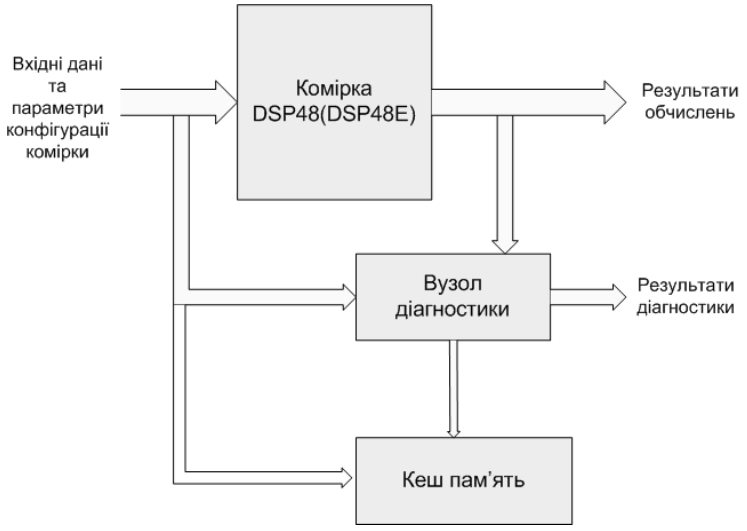



Рис. 4. Схема організації діагностування обчислювальної комірки.

## Висновки

Даний підхід забезпечення відмовостійкості дозволяє створювати проектувати системи опрацювання сигналів з можливістю динамічного реконфігурування обчислювальних ресурсів у разі виникнення збою. Застосування інтелектуальних алгоритмів діагностування обчислювальної комірки забезпечить виявлення повного спектру збоїв та відмов при виконанні обчислень і тим самим збільшити стійкість обчислень в цілому.

### Список літератури


*1. Теслер Г.С.*. Концепция создания вычислительных средств с высоким уровнем отказоустойчивости //Математические машыни и системы.-2002., №2.- с.176-183.

*2. Koren I.,Krishna C.M.* Fault-tolerant systems . Morgan Kaufmann Publishers. San Francisco-USA, 2007.-p.399.

3. *Goessel Michael* Fault Tolerant Systems. Problems and Solutions /University of Postdam, Institute for Informatics, Fault Tolerant Computing Group, 2004.

4. *Kohout L.* Partial Denamic Reconfiguration in Xilinx FPGA Circuits / CAK Embeded Systems Colloquim., 2007.

5. *Xilinx*. XtremeDSP for Virtex-4 FPGAs User Guide. // UG073, 2008.

6. *Xilinx*. Virtex-5 FPGA XtremeDSP Design Considerations User Guide.// UG193**,** 2009.

УДК 006.91-389.14

*В.У. Ігнаткін, д.т.н., В.А. Литвиненко, аспірант*
*(Дніпродзержинський державний технічний університет, Україна)*

# МОДЕЛІ ОЦІНКИ ВИБОРУ І ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ (ЗВТ) ТА ПРОЦЕСІВ ЇХ МЕТРОЛОГІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

*Запроповані моделі оцінювання вірності вибору і ефективності застосування ЗВТ за інформаційним та економічним критеріями; представлені залежності метрологічної надійності ЗВТ та часу роботи ЗВТ без відмов від періоду проведення перевірочних робіт.*

При організації контрольно-вимірювальних операцій, контролю якості продукції на виробництві виникає проблема, яка полягає в обгрунтуванні оптимальної кількості вимірювань, виборі відповідного класу точності ЗВТ та оптимізації параметрів метрологічного обслуговування ЗВТ. При цьому потрібно враховувати мінімізацію витрат на контроль якості і утримування системи метрологічного обслуговування засобів вимірювальної техніки(СМО ЗВТ).

Для розв'язання поставленних задач необхідно розглянути порядок визначення класа точності ЗВТ, визначити критерії мінімізації числа вимірювань; синтез моделей процесів метрологічного обслуговування ЗВТ для вирішення оптимізаційних задач СМО ЗВТ.

Математичне описання процесу вимірювань показує, що за результатами вимірювань неможливо визначити дійсне значення параметра, а можливо лише вказати інтервал, в якому з визначенною ймовірністю $P'$ воно знаходиться.

Нехай необхідно забезпечити довірочний інтервал - $\Delta$ з довірочною ймовірністю $P'$ тоді можна запропонувати ряд ЗВТ з середньо квадратичними відхиленнями(СКВ) - $\delta_1', \delta_2', \delta_3', ..., \delta_i', ...$ яким відповідатимуть кількості вимірювань $Z_1, Z_2, Z_3, ..., Z_i, ...$ параметра $\beta$. Представляє інтерес визначити клас ЗВТ, що задовольняє цим вимогам $-\Delta, P'$ деяким оптимальним чином. Допустимо, що в якості критерія оптимальності вимірювань прийнята питома інформація:

$$h_1 = I/Z\left[\text{біт}/\text{вимірювання}\right], \tag{1}$$

де $I = -\int_{-\infty}^{+\infty} \log_2\left[f(t)\right] \cdot f(t)dt - \log_2 \Delta$ - кількість інформації при вимірюванні параметра $\beta$, $f(t)$ - густина розподілу похибки вимірювань[1-2].

Назвемо показник $h_1$ – інформаційною ефективністю вимірювань. Тоді оптимальному класу точності ЗВТ буде відповідати максимальне значення інформаційної ефективності. Для заданих значень $Z$, $P'$, $t_p$ (параметр, який залежить від виду закона розподілення похибки вимірювань) можливо розрахувати за допомогою ЕОМ значення функції $h_1$ і побудувати графіки, котрі дозволяють вибирати оптимальну по $h_1$ кількість вимірювань і відносний довірочний інтервал $\Delta/\sigma'$ для заданих значень $P'$.

В процесі вимірювань беруть участь оператор і ЗВТ. У зв'язку з цим, необхідно визначити таку кількість вимірювань, котра призводить до ефективного використання ЗВТ при достатній продуктивності оператора. Для цього застосуємо наступну умовну цільову функцію:

$$Ц = \mathrm{C_{вим}Z} + \mathrm{C_{ЗВТ}}(100 - \mathrm{h_1}), \tag{2}$$

де $C_{вим}$ - вартість вимірювань без вартості ЗВТ; Z – кількість вимірювань; $C_{ЗВТ}$ – вартість ЗВТ; $h_1$ – інформаційна ефективність вимірювань, %. Для визначення оптимальної кількості вимірювань, мінімізують задану цільову функцію( беруть похідну від $Ц$ по Z і прирівнюють до нуля). За допомогою ЕОМ для ряда значень $P'$(99.9; 99; 95; 90; 50; 10%) і Z(2,3…,10) можливо розрахувати значення функції $\mathrm{dh_1}/dZ$. Із аналіза графіка (рис. 1) видно,

що частина рішень знаходиться в області від'ємних значень. Цей недолік виключають, виразивши інформацію:

$$\mathrm{I} = \mathrm{C}(\mathrm{P}') + \log_2 \frac{\sqrt{Z-1}}{t_p},$$

(3)

що в свою чергу призведе до наступної зміни рівнянь цільової функції від виду $\mathrm{dh}_1 / dZ = C_{вим} / \mathrm{C}_{\mathrm{ЗВТ}}$ до виду $\mathrm{dh}_1^* / dZ = \frac{C_{вим}}{C_{ЗВТ}} - \frac{C(P')}{\mathrm{Z}^2}$ (на рис.1 зображені пунктиром). Таким чином, мінімізація числа вимірювань здійснюється на основі аналіза цільової функції, основу якої складає відношення вартості виконаних вимірювань до вартості ЗВТ.

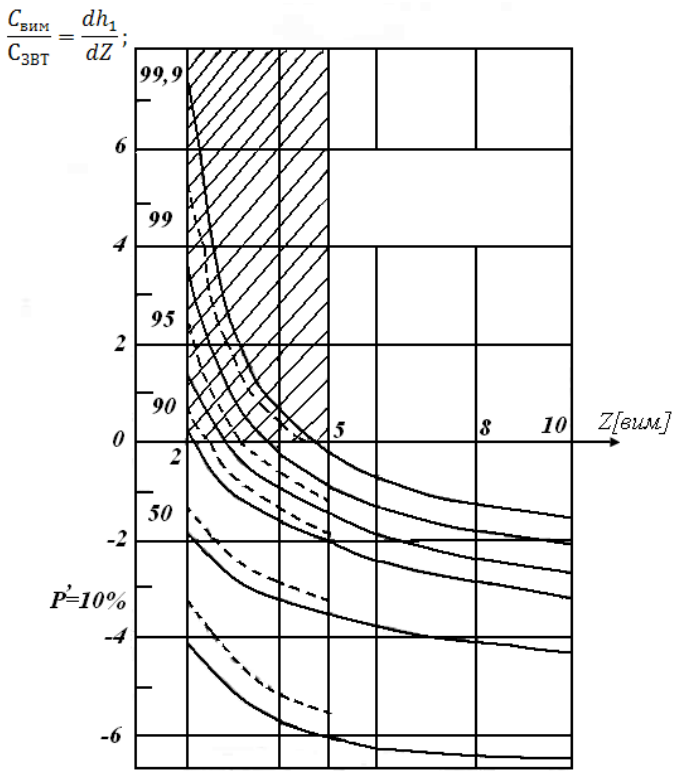



Рисунок 1. Залежність відношення вартості вимірювань $C_{вим}$ до вартості ЗВТ $C_{ЗВТ}$ від кількості вимірювань Z при різних значеннях довірочної ймовірності $P'$

Збільшення парку засобів вимірювальної техніки, інтенсивніший режим їх експлуатації приводить до різкого збільшення об'єму вимірювальної інформації. Крім того, збільшується кількість відмов в приладах.

Однією з основних задач метрологічного обслуговування ЗВТ є прогнозування та своєчасне виявлення прихованих(метрологічних) відмов при експлуатації ЗВТ.В загальній кількості відмов ЗВТ доля метрологічних відмов складає, по різним оцінкам від 40 до 100%, а процес перевірки( порівняння показів ЗВТ з показами зразкових приладів) 40% метрологічного забезпечення виробництва. Збільшення міжперевірочного проміжку (МПП) призводить до зростання ймовірності виникнення прихованої відмови, зменшення - до зростання витрат на підтримання парку ЗВТ у метрологічно налагодженому стані. З цього боку, завдання визначення МПП можна сформулювати залежністю:

$$\mathrm{P}_{\mathrm{M}}(t_0) - P_{МД} = 0, \qquad (4)$$

де $\mathrm{P}_{\mathrm{M}}(t_0)$ – ймовірність появи відмови за період $t_0$;

$P_{МД}$ - мінімальне значення метрологічної надійності, яке може бути допущене за умови використання ЗВТ (визначається з розрахунку на призначення ЗВТ).

Тоді залежність $P_M(t)$ з урахуванням при наявності деякого числа перевірок $N_n$ та заданих величин $P_{МД}$ може бути зображена у вигляді графіка рис.2.

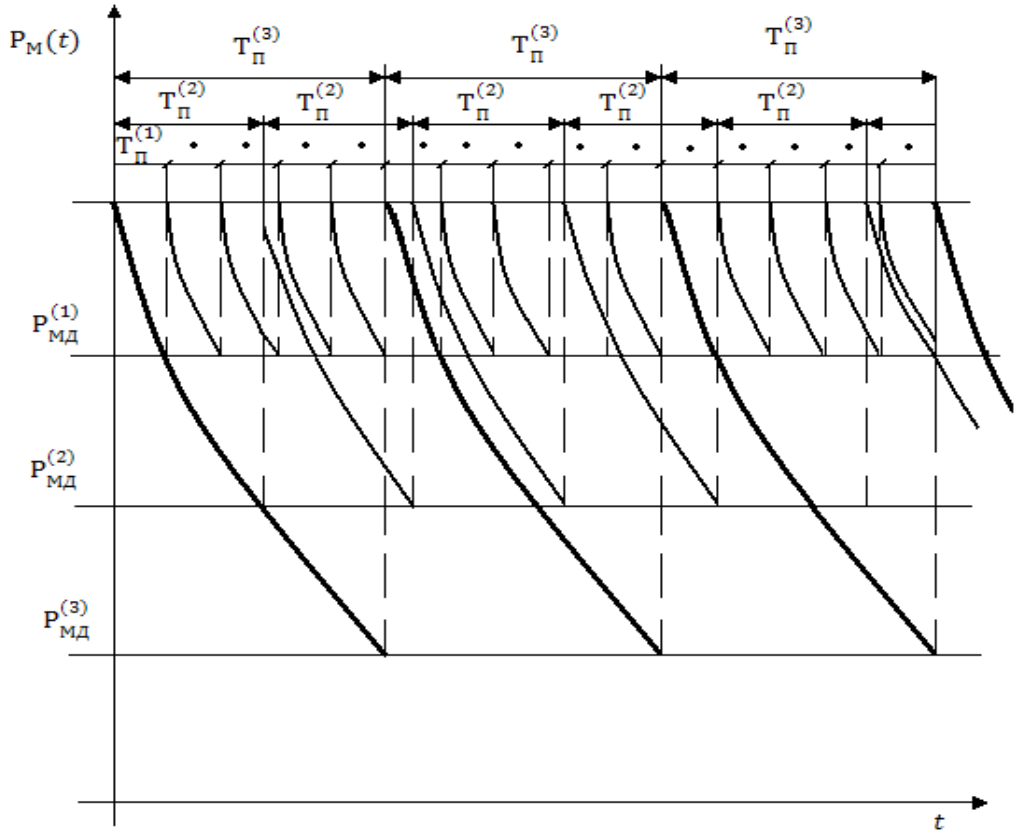



Рисунок 2. Зміна метрологічної надійності ЗВТ при проведенні проміжних перевірок

Для одного і того ж приладу збільшення кількості перевірок призводить до збільшення значення $P_{МД}$ , так само як і зменшення значення $P_{МД}$ зменшує кількість перевірок (збільшується $T_n$).

Якщо вважати, що $t_1,\ldots,t_5$ - час перебування ЗВТ в одному з п'яти станів протягом одиничного життєвого циклу $T_ц$, то на підставі відношення: $P_{1...5} = t_{1...5} / T_ц$, можна визначити $t_1$ -значення математичного очікування сумарного часу роботи ЗВТ без відмов(явних і прихованих)(рис.3) та комплексних показників надійності ЗВТ протягом циклу $T_ц$. В припущенні що закони розподілу винекнення явних і прихованих відмов експоненціальні і виникають незалежно одна від одної:

$$t_1 = \frac{T_c T_я}{T_c + T_я}\left(1 - e^{-(T_n - \tau_n)\frac{T_c + T_я}{T_c T_я}}\right)\sum_{k=0}^{\infty} P_{1,к} \qquad (5)$$

$P_{1,к}$ - ймовірність виявити ЗВТ відразу після $к$-ої перевірки відповідно в працездатному стані без прихованих відмов; $T_я$ , $T_c$ – середнє напрацювання на явну та приховану відмову відповідно; $\tau_n$ - математичне очікування часу виконання перевірки. При розрахунках враховуються показники якості МО ЗВТ $\alpha_n$ - ймовірність хибної діагностики прихованої відмови при перевірці; $\beta_n$ - ймовірність невиявлення прихованої відмови при перевірці; $\beta_p$ - ймовірність повернення ЗВТ з ремонту з прихованою відмовою[3-4].

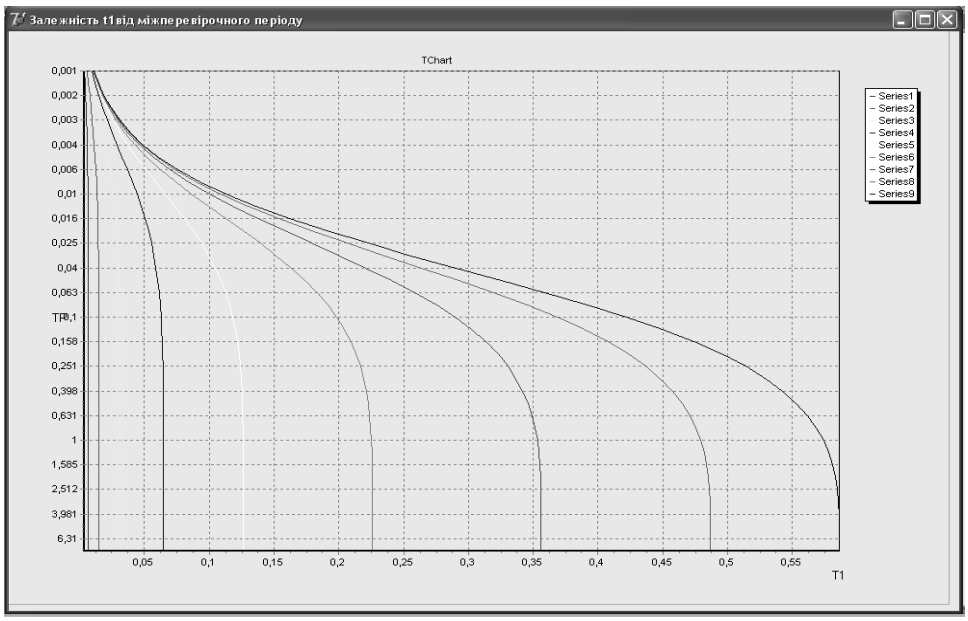



Рисунок 3.Графік залежністі математичного очікування часу безвідмовної роботи(T1) від періоду проведення перевірочних робіт($T_n$) при різних значеннях математичного очікування прихованих відмов($T_c$ - всього дев'ять елементів масиву, що відповідає дев'яти кривим:100.0; 215.443; 464.158; 1000.0; 2154.43; 4641.48; 10000.0; 21544.3; 46415.8.годин); (масштаб логарифмічний)

Розглянуті моделі входять в комплексну модель процесів МО ЗВТ схеми вироблення оптимальних керуючих рішень в автоматизованій системі керування МО ЗВТ[5].

## Висновки

Запропоновані підходи дозволяють за допомогою ЕОМ визначати клас точності ЗВТ за критерієм інформаційної ефективності, мінімізувати число вимірювань на основі аналізу цільової функції вартості проведених вимірювань, а також досліджувати та прогнозувати винекнення відмов в ЗВТ під час їх експлуатації.

## Список літератури


1. *Игнаткин В.У и другие* . Автоматизация метрологического обслуживания средств измерений промышленного предприятия. М.:Изд-во стандартов,1988.208с.
2. *Игнаткин В.У., Литвиненко В.А*. Модель оценивания правильности выбора и эфективного использования средств измерений.Зб. наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості 1(29), м.Севастополь,2009р.с 100-106.
3. *Вітків Л.М., Ігнаткін В.У., Литвиненко В.А*. Комп'ютерне коригування міжперевірочних інтервалів засобів вимірювальної техніки за критерієм мінімуму витрат.Системи обробки інформації. В.6(73).Харків 2008 р.с 24-28.
4. *Ігнаткін В.У., Литвиненко В.А., Литвиненко Л.В*. Аналіз залежностей показників надійності засобів вимірювальної техніки від параметрів системи метрологічного обслуговування. Матеріали 13-го міжнародного форума « Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», м.Харків 2009р.
5. *Игнаткин В.У., Литвиненко В.А*. Модель функционирования метрологической службы. Кибернетический подход. Матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз та інформаційні технології», м.Київ 2009р.

УДК 531.74

*С.Г. Пожарский, аспирант*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# МОДЕЛЬ СЕКТОРНОЙ ШКАЛЫ И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ЕЁ ШТРИХОВ

В работе рассмотрена модель секторной угломерной шкалы и алгоритм определения погрешностей штрихов шкалы.

Вступление. Создание метрологической модели предшествует проведению аттестации (калибровке) секторных угломерных шкал. Для круговых шкал характерно наличие базовой цилиндрической поверхности, которая определяет с высокой точностью положение центра шкалы. Для секторных шкал базовая поверхность либо отсутствует, либо имеет большие допуски, при этом угловая протяжённость базовой поверхности может быть на много меньше 360°. Всё это в совокупности приводит к невозможности осуществления аттестации (поверки) с необходимой точностью. Кроме того, известные методы определения погрешности угломерных шкал либо неприменимы, либо дают погрешность во много раз превышающую заданную конструкторской документацией. В связи с этим метрологическая задача разбивается на две подзадачи: во-первых, необходимо построить модель шкалы и, во-вторых, для этой модели разработать метод определения погрешности шкалы, имеющий необходимую точность.

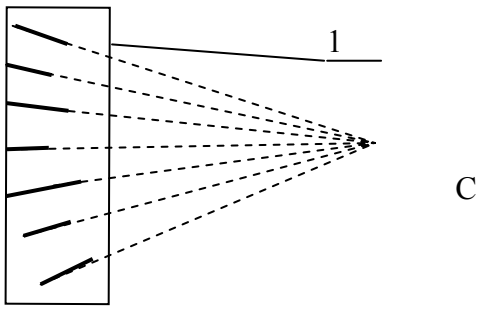



Рис. 1. Секторная шкала

Модель шкалы, представленная на рисунке 1, не имеет базовых цилиндрических поверхностей (поз. 1), штрихи представлены в виде отрезков прямой линии, продолжение которых пересекаются в одной точке С. На основании представленной модели можно сделать следующее предположение: все точки одного штриха шкалы имеют равное угловое значение и равную угловая погрешность. Отличие реальных штрихов от модели в том, что реальные штрихи имеют ширину, поэтому, для перехода к модели, штрихи которой имеют нулевую ширину, мы заменяем штрихи шкалы их осями – отрезками прямой линии.

Погрешность угломерной шкалы имеет несколько составляющих, из которых выделим погрешность изготовления шкалы и погрешность сборки. Под погрешностью сборки мы подразумеваем погрешность эксцентриситета, появляющуюся при установке шкалы и (или) подвижного указателя (стрелки) в измерительное устройство. В данной работе рассматривается погрешность изготовления шкалы.

Основная сложность в разработке метода определения погрешности секторных шкал заключается в отсутствии физического (материального) центра шкалы. Как видно из рисунка 1 центр шкалы, как точка пересечения прямых линий, проходящих через штрихи, лежит вне габаритных размеров шкалы поз.1. Даже в случае задания в конструкторской документации положения центра шкалы, при определении (во время аттестации) погрешности шкалы, погрешность измерения будет включать погрешность допуска и погрешность воспроизведения заданных размеров. При этом максимальная погрешность шалы при допуске, равном 0,1 мм, будет иметь следующую зависимость от радиуса шкалы:

$$\Delta = arctg\frac{D\sqrt{2}}{R},$$

где D – допуск координаты, определяющей положение центра шкалы; R – радиус шкалы.

Для решения поставленной задачи автором был предложен метод [1], который можно назвать координатным, поскольку исходной информацией являются координаты точек штрихов шкалы. Предложенный метод хорошо вписывается в приведённую выше модель шкалы. Метод заключается в использовании известных соотношений аналитической геометрии [2]. В рамках этой геометрии задача определения угла между двумя прямыми решается в соответствии с формулой (1).

$$tg\gamma_{12} = \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 \cdot k_2} \quad (1)$$

где $\gamma_{12}$ – угол между двумя прямыми с угловыми коэффициентами $k_1$ и $k_2$.

Прямая линия определяется двумя точками (2):

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

где $P_1(x_1,y_1)$ и $P_2(x_2,y_2)$ – две несовпадающие точки,

или $$y = k_1 \cdot x + b_1$$

где $$k_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \qquad b_1 = -\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot x_1 + y_1$$

При этом исходными данными для решения этой задачи могут быть координаты трёх точек. Применительно к нашей задачи (рис.1) этими точками будут точка центра шкалы, точка нулевого (начального) штриха и точка штриха, погрешность которого определяется. В работе [1] был сформулирован новый подход к определению центра шкалы: надо "…искать не центр шкалы, а точку, относительно которой угловые погрешности штрихов шкалы минимальны". Способ реализации алгоритма поиска минимальных (оптимальных) погрешностей штрихов шкалы подтверждён патентом Украины [3]. Координаты точек штрихов шкалы определяются с помощью измерительного микроскопа, например УИМ-23, относительно встроенной в микроскоп ортогональной системы координат. Координаты точки середины штриха определяются как среднее арифметическое соответствующих координат двух точек, лежащих на противоположных боковых кромках штриха:

$$y_i = \frac{y_i' - y_i''}{2}, \qquad x_i = \frac{x_i' - x_i''}{2},$$

где $Q'i(x_i',y_i')$, $Qi''(x_i'',y_i'')$ – точки, лежащие на двух кромках одного штриха.

Таким образом, исходной измеряемой информацией являются координаты точек кромок штрихов, конечной, выходной информацией – значения погрешностей штрихов шкалы. Составим структурную схему алгоритма, связывающего исходную и выходную информации (рисунок 2).

В приведённом алгоритме операции IV – VII выполняются до тех пор, пока погрешности не будут оптимальны.

Все этапы, кроме III и VII, связаны между собой уравнениями: результаты предыдущих этапов являются исходными данными последующих этапов. Координаты предварительного (первичного) центра шкалы (этап III) можно получить либо как координаты произвольной точки, лежащей с вогнутой стороны шкалы, либо, как координаты центра окружности, определённой по точкам трёх штрихов шкалы.

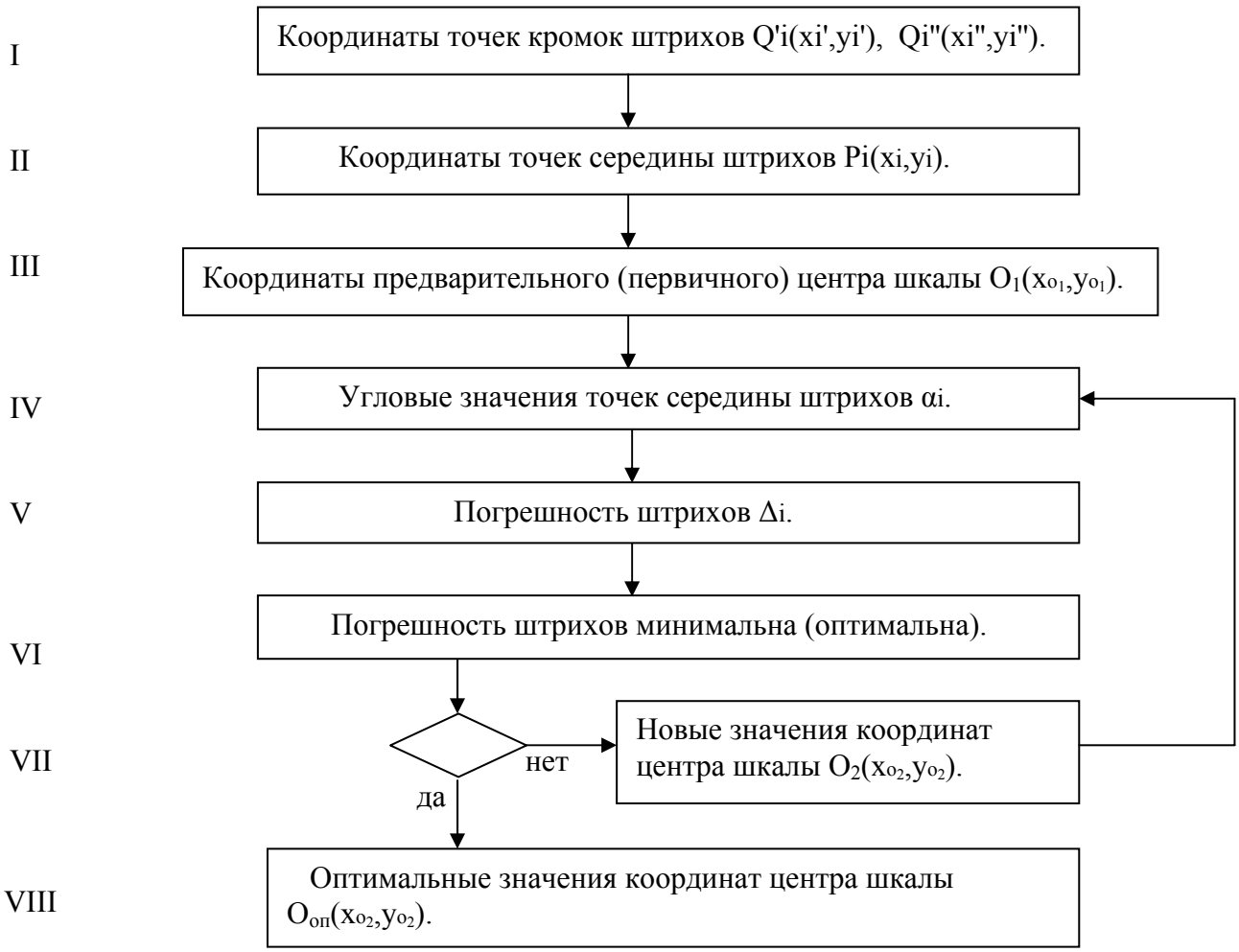



Рисунок 2. Алгоритм определения погрешностей.

Во втором случае алгоритм определения координат первичного центра шкалы будет следующим:

1) Выбирают три точки $P_1(x_1,y_1)$, $P_2(x_2,y_2)$ и $P_3(x_3,y_3)$ середин трёх штрихов шкалы, один из которых расположен в середине шкалы, например $P_2$, а два – по краям.

2) Определяют координаты точек середины двух отрезков, ограниченные выбранными тремя точками ($P_1P_2$ и $P_2P_3$)

$$y_{C1}=\frac{y_1+y_2}{2},\qquad x_{C1}=\frac{x_1+x_2}{2}\ ,\qquad y_{C2}=\frac{y_3+y_2}{2},\qquad x_{C2}=\frac{x_3+x_2}{2}.$$

3) Определяют уравнения двух прямых, проходящих через точки $P_1P_2$ и $P_2P_3$

$$y=k_1\cdot x+b_1,\quad y=k_2\cdot x+b_2,$$

где $k_1=\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1},\qquad b_1=-\frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}\cdot x_1+y_1\qquad k_2=\frac{y_3-y_2}{x_3-x_2},\qquad b_1=-\frac{y_3-y_2}{x_3-x_2}\cdot x_2+y_2.$

4) Определяют уравнения перпендикулярных прямых к прямым по этапу 3) и проходящих через точки $P_{C1}(x_{C1},y_{C1})$, $P_{C2}(x_{C2},y_{C2})$ по этапу 2)

$$y=k_{П1}\cdot x+b_{П1},\quad y=k_{П2}\cdot x+b_{П2},$$

где $k_{П1}=-\frac{1}{k_1},b_{П1}=\frac{x_1}{k_1}\cdot+y_1,\qquad k_{П2}=-\frac{1}{k_2},b_{П2}=\frac{x_2}{k_2}\cdot+y_2$

5) Определяют координаты точки пересечения прямых по этапу 4)

$$y_{C1}=-\frac{b_{П1}-b_{П2}}{k_{П1}-k_{П2}}\times k_{П1}+b_{П1},\qquad x_{C1}=-\frac{b_{П1}-b_{П2}}{k_{П1}-k_{П2}}$$

Приведённый алгоритм позволяет получить координаты первичного центра шкалы, относительно которого погрешности штрихов как правило велики. В качестве примера на рисунке 4 приведён график погрешностей шкалы относительно первичного центра. Максимальную погрешность, равную 103,7', имеет штрих с номинальным значением минус 30°.

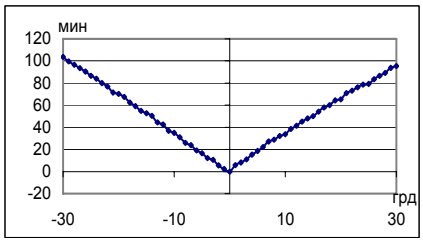



Рис. 4. Распределение погрешности штрихов относительно первичного центра

Поиск оптимального центра шкалы (относительно которого погрешности штрихов имеют оптимальное значение) предложено в работах [1, 3] реализовывать путём последовательного изменения сначала одной координаты первичного центра шкалы, а затем другой.

Направление изменения координат выбирается таким, которое соответствовало бы уменьшению погрешности штрихов. Первая координата первичного центра изменяется до получения минимального значения максимальной погрешности штрихов, причём шаг изменения может быть переменным. Результат изменения одной координаты (Y) иллюстрируется рисунком 5, на котором приведён график погрешностей той же, что и на рисунке 4, шкалы при изменении координаты Y на 4,430 мм.

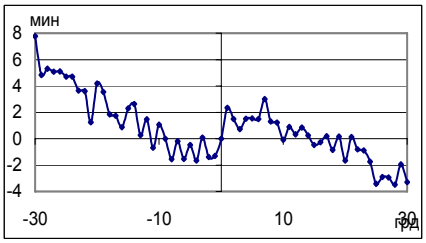



Рис. 5. Распределение погрешности штрихов при изменении одной координаты центра.

Как видно из представленных графиков, максимальная погрешность (для штриха минус 30°) уменьшилась в 13,3 раз с 103,7' до 7,8'. Изменение другой координаты (на 0,946 мм) приводит к распределению погрешностей, график которых представлен на рисунке 6. Максимальная погрешность при этом уменьшилась ещё в 3,4 раза (с 7,8' до 2,3').

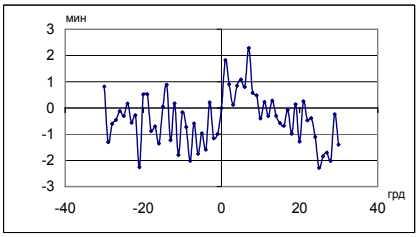



Рис. 6. Распределение погрешности штрихов при изменении второй координаты центра

## Выводы

1. В работе предложены геометрическая модель секторной угломерной шкалы.
2. На основании этой модели разработан алгоритм определения погрешностей изготовления штрихов секторной угломерной шкалы.
3. Существенной особенностью предложенного алгоритма является определение положения центра шкалы, относительно которого погрешности штрихов шкалы имеют оптимальное распределение погрешностей.

## Список литературы


1. *Пожарский С.Г.* Определение погрешности изготовления угломерных шкал с диапазоном измерения меньше 360°. Украинский метрологический журнал. 2006, №3, с.41-43.
2. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. Изд. “Наука”. Москва, 1968 г. 720 стр.
3. *Патент 73892 України.* Спосіб визначення похибки кутової шкали. С. Г. Пожарський. Опубл. 15.09.2005. Бюл. № 9.

УДК : 551.501.501.508

*І.А. Орнатський, к.т.н., О.А. Вінічук, нач. лабораторії*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ДАТЧИК ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

*На даний момент для оперативного автоматизованого контролю вологості повітряного середовища найбільшого поширення набули вимірювальні перетворювачі ємнісного типу. При застосуванні таких приладів для вимірювання рівнів вологості виникають проблеми зміщення характеристики перетворення, що призводить до динамічної похибки вимірювання. Зазначений недолік вирішується за рахунок використання інтелектуального вимірювального перетворювача.*

Об'єкт дослідження – метрологічні характеристики сенсорів вологості, у тому числі при тривалих періодах високої вологості. Мета роботи - створення діючого макету вимірювача вологості. Метод дослідження - аналіз опублікованих даних, лабораторний експеримент та теоретичні розрахунки.

У ємнісних сенсорів вологості при тривалому перебуванні при високій відносній вологості спостерігається зсув характеристики перетворення і підвищується інерційність. При достатньо довгому перебуванні в умовах вологості, значення якої знаходяться в межах 95-100 % відбувається процес насичення матеріалу ємнісного датчика вологості. Це призводить до того, що при зниженні рівня вологості виникає додаткова похибка. Час для відновлення метрологічних характеристик вимірювального перетворювача може досягати годин.

Для зменшення або виключення похибки вимірювання, що виникає при цьому, необхідно розробити такий алгоритм вимірювання, за якого сенсор не буде довго знаходитись при високій вологості. Цього можна досягти з допомогою підігріву повітря, в якому знаходиться сенсор вологості. При цьому відносна вологість цього повітря зменшиться, а точка роси залишиться незмінною. Обраний нами сенсор SHT11 [ 1 ] фірми Sensirion (Швейцарія) має вбудований підігрівач, який дозволяє реалізувати алгоритм вимірювання з підігрівом. Для того, щоб визначити температуру довколишнього повітря, необхідний додатковий сенсор температури. В якості додаткового сенсора температури не нагрітого повітря використовується температурний сенсор DS1624 [ 2 ] фірми Dallas Semiconductor (США).

У дійсності умови високої відносної вологості спостерігаються досить часто. Як приклад можна навести дані метеорологічних спостережень (температура, відносна вологість і точка роси) на метеостанції у донецькому аеропорту. Такі умови досить типові для України, особливо навесні та восени.

На практиці висока відносна вологість може триматися більше доби і практично кожен день. Весь цей час можуть реєструватися спотворені вимірювальні дані. Це особливо погано з огляду на те, що погіршення метрологічних характеристик при високих значеннях вологості призводить до підвищення помилки прогнозування туманів, опадів, випадання роси, що особливо важливо при метеорологічному забезпеченні авіації.

Для досягнення поставленої мети використаний підігрів датчика вологості. Це еквівалентно зменшенню рівня вологості. Таким чином не відбувається насичення вологою матеріалу ємнісного датчика. У вимірювачі відносної вологості повітря передбачена можливість підігріву повітря, в якому знаходиться чутливий елемент.

На рисунку 1 зображені показання вологості сенсорів з підігрівом (червона крива) і без нього. З рисунку видно, що після періоду 100 % відносної вологості, підігрітий сенсор вимірює дійсну відносну вологість, а не підігрітому сенсору необхідний час для відновлення після конденсації.

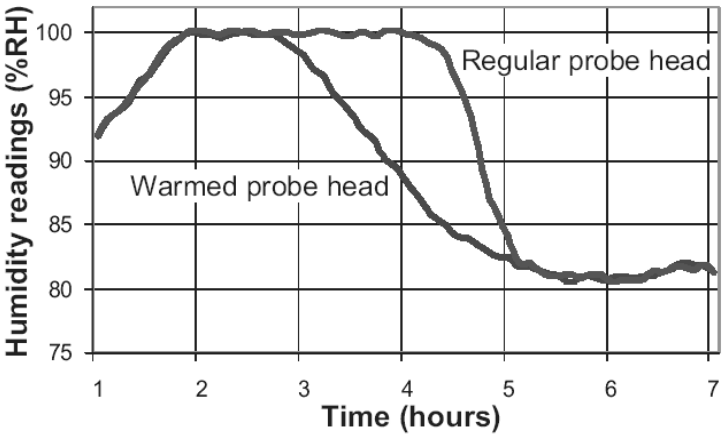


Рис.1

Нижченаведена методика розрахунку відносної вологості повітря розроблена саме для підігрітого сенсору вологості з метою збереження його від довгого перебування під впливом високої вологості і запобігання втрати їм метрологічних характеристик. За відсутності підігріву уникнути похибки від насичення вологою сенсора неможливо.

Виходячи з того, що температура, відносна вологість та точка роси зв'язані між собою функціональними залежностями, можна вивести формулу для розрахунку відносної вологості довколишнього повітря.

Відносна вологість F – відношення пружності водяної пари до максимальної пружності при даній температурі, виражене у відсотках,

$$F = \frac{e}{E} \cdot 100\,\% \tag{1}$$

де $e$ - парціальний тиск водяної пари в повітрі;
$E$ - парціальний тиск водяної пари, який знаходиться в стані насичення по відношенню до плоскої поверхні хімічно чистої води.

Парціальний тиск можна визначити формулою:

$$E = 6{,}112 \cdot e^{\frac{a \cdot T}{b+T}}, \tag{2}$$

де $T$ – температура, °С;

$a$ = 17,5043;

$b$ = 241,2.

Формула для розрахунку точки роси $DP$ (°С):

$$DP = \frac{b\left(\frac{a \cdot T}{b+T} + \ln\left(\frac{F}{100}\right)\right)}{a - \left(\frac{a \cdot T}{b+T} + \ln\left(\frac{F}{100}\right)\right)}, \tag{3}$$

де $T$ – температура, °С;

$F$ – відносна вологість повітря, %;

$a$ = 17,5043;

$b$ = 241,2.

Відтак, знаючи точку роси повітря у підігрітому сенсорі та довколишню температуру, можна визначити відносну вологість зовнішнього повітря за формулою:

$$F = \frac{E(DP)}{E(T)} \cdot 100\,\%, \tag{4}$$

де $E(DP)$ – парціальний тиск водяної пари при температурі точки роси підігрітого сенсора;

$E(T)$ - парціальний тиск водяної пари при зовнішній температурі.

Цю формулу можна перетворити в більш зручний для розрахунку вигляд за допомогою алгебраїчних перетворень. Як наведено вище, точка роси зовнішнього повітря та підігрітого повітря всередині сенсора рівні. Тоді:

$$DP_1 = DP_2. \tag{5}$$

Підставляючи в цей вираз формулу (1.4), отримаємо:

$$\frac{b \cdot \left( \frac{a \cdot T_1}{b + T_1} + ln\left( \frac{F_1}{100} \right) \right)}{a - \left( \frac{a \cdot T_1}{b + T_1} + ln\left( \frac{F_1}{100} \right) \right)} = \frac{b \cdot \left( \frac{a \cdot T_2}{b + T_2} + ln\left( \frac{F_2}{100} \right) \right)}{a - \left( \frac{a \cdot T_2}{b + T_2} + ln\left( \frac{F_2}{100} \right) \right)} \tag{6}$$

де $T_1$ – температура повітря в підігрітому сенсорі;
$T_2$ – температура довколишнього повітря;
$F_1$ – відносна вологість повітря у підігрітому сенсорі;
$F_2$ - відносна вологість довколишнього повітря.

Звідси визначимо:

$$F_2 = F_1 \cdot e^{\left( \frac{a \cdot T_1}{b + T_1} - \frac{a \cdot T_2}{b + T_2} \right)}. \tag{7}$$

Аналіз похибок, що найбільш за все впливають на результат вимірювання показав наступне. При вимірюванні невисокої відносної вологості, тобто коли сенсор не підігрівається, похибка визначається лише похибкою сенсора вологості. У цьому випадку похибка зменшиться шляхом калібрування вимірювача, тому його не враховувати. При високій відносній вологості сенсор потрібно підігрівати. Для розрахунку величини відносної вологості використовуються величини температури внутрішнього термометра  и зовнішнього . Похибка результату  залежить від похибок цих термометрів. Розглянемо  варіант, коли точно відома температура, на яку підігрівається сенсор ( дорівнює 5 °С). Врахуємо тільки похибку

від дискретності термометрів. Для сенсора SHT15 вона складає 0,01 °С, а для сенсора DS1624 – 0,03 °С. Ці величини порівнювались. З допомогою табличного процесора були розраховані максимальну величину похибки для різних величин температури в діапазоні від мінус 40 °С до + 40 °С і відносній вологості довколишнього повітря від 70 до 100 %.

В процесі роботи був виготовлений макет вимірювального пристрою. На ньому були проведені натурні випробування. Результати цих випробувань підтвердили правильність теоретичних розрахунків. По результатам експериментальних досліджень проводяться роботи для подальшого використання датчиків даного типу для метеорологічних досліджень.

## Висновки

Результати модельного експерименту інтелектуального вимірювача вологості повітря підтвердило правильність теоретичних розрахунків.

Інтелектуальний вимірювач вологості дозволяє проводити вимірювання вологості повітря в навколишньому середовищі з урахуванням процесів насичення сенсору вологою і дозволяє компенсувати додаткову похибку, пов’язану з цим.

Похибка вимірювання вологості зменшена до значення 1 %, що дуже важливо при вимірюваннях з рівнями вологості близьких до 100 %.

Результат досягнуто завдяки проведенню багатоступеневих опосередкованих вимірювань за допомогою інтелектуального вимірювального перетворювача.

## Список літератури


1. «Sensirion humidity.pdf», datasheet for SHT- series humidity sensor, www.sensirion.com
2. «DS1624.pdf», datasheet for DS1624 temperature sensor, www.maxim-ic.com

УДК: 519.00.00

*Н.А. Яремчук, к.т.н, М.В. Галёвская*
*(НТУУ «КПИ», Украина)*

# СРАВНЕНИЕ ПРИБЛИЖЕННЫХ МЕТОДОВ ОБЪЕДИНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ С ОЦЕНИВАНИЕМ ТИПА А И В

*В статье рассмотрены варианты расчета расширенной неопределенности с составляющими с оцениванием типа А и В. Показана неоднозначность результата использования формулы Велча-Саттерсвейта и аппроксимирующих выражений при назначении числа степеней свободы для составляющих с оцениванием типа В. Доказано преимущество подхода, задекларированного в отечественных нормативных документов на основании анализа и моделирования.*

## Введение

В последние годы предлагается использование многочисленных подходов к оцениванию расширенной неопределенности. В [1] предлагается систематизация методов на три группы: точные, численные и приближенные. Кроме того, перспективными являются возможности представления результата измерения посредством теории возможности [2] и, соответственно, можно выделить группу нечетких методов оценивания расширенной неопределенности. Очевидно, что использование трудоемких методик или разработка программных средств для прикладных целей не всегда целесообразны. Поэтому наиболее востребованной все-таки остается группа приближенных методов. При этом, рассматривают различные варианты с использованием коэффициентов формы (в первую очередь эксцесса) и обобщенных распределений [3], аппроксимации полиномами, эмпирических выражений [1].

Цель данной работы сравнить «узаконенные» подходы, то есть задекларированные в действующих нормативных документах и рекомендуемые для использования в отечественной метрологической практике.

## Обзор методов и их реализация

Согласно [4] расширенная неопределенность (expanded measurement uncertainty) – это произведение комбинированной стандартной неопределенности и покрывающего фактора (коэффициента охвата). В отношении расчета комбинированной стандартной неопределенности разногласий нет. Таким образом, проблема оценивания неопределенности сводится к оцениванию коэффициента охвата.

**Методы с использованием числа степеней свободы**

Подход [5] предусматривает использование в качестве покрывающего фактора коэффициента Стьюдента при объединении составляющих типа А и типа В (1):

$$K(P) = t(\nu_{eff}, P), \tag{1}$$

где $t(\nu_{eff}, P)$ – коэффициент Стьюдента для уровня доверия $P$ и эффективного числа степеней свободы $\nu_{eff}$, которое вычисляется по теореме Велча-Саттерсвейта (2)

Использование формулы также трактуется неоднозначно. Так, если полагают, что число степеней свободы для составляющих с оцениванием типа В $\nu_{Bj} = \infty$ , а типа А $\nu_{Ai} = n - 1$. Тогда формула (2) приобретает вид (3). Для уточнения оценок в [5] предлагается формула для числа степеней свободы:

$$\nu_{Bi} \approx \frac{1}{2}\frac{u^2(x_i)}{\sigma^2[u(x_i)]} \approx \frac{1}{2}\left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)}\right]^{-2}, \tag{2}$$

где $\sigma^2[u(x_i)]$ − дисперсия оценки неопределенности; $\Delta u(x_i)/u(x_i)$ − относительная неопределенность оцененной по типу В неопределенности.

В [6], формула интерпретирована так: :

$$\nu_B \approx \frac{1}{2}\left[\frac{u_L^2}{L^2}+\frac{1}{\left(\Phi^{-1}(P)\right)^2}\frac{\pi}{2}e^{\left[\Phi^{-1}(P)\right]^2}u_P^2\right]^{-1}, \qquad (3)$$

где $u_L$ – неопределенность граничных значений $L$; $u_P$ – неопределенность значения доверительной вероятности; $\Phi^{-1}(P)$ – обратная функция Лапласа.

В [7] рассматриваются варианты упрощения приведенного выше подхода с целью избежания расчета эффективного числа степеней свободы. С использованием работ Велча и Фишера в [7] предлагается использование выражение для покрывающего фактора при наличии двух составляющих неопределенности (6) на основании значения квантиля нормального распределения $\xi_P$.

В случае принятия числа степеней свободы $\nu_B$ равным бесконечности и:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2 ,$$

формула (6) примет вид (7). Автор [7] предлагает еще более простое выражение (8).

Таблица 1. Формулы для коэффициента охвата

| | $\nu_B \neq \infty$ | | $\nu_B = \infty$ | |
|---|---|---|---|---|
| 1 | $K(P) = t(\nu_{eff}, P)$ | | | |
| | $\nu_{eff} = \dfrac{u_c^4}{\dfrac{u_A^4(y)}{\nu_A}+\dfrac{u_B^4(y)}{\nu_B}}$ | (4) | $\nu_{eff} = (n-1)\left[1+\dfrac{u_B^2}{u_A^2}\right]^2$ | (5) |
| 2 | $K(P) = \xi_P\left[1+\dfrac{1+\xi_P^2}{4u_c^4}\cdot\left(\dfrac{u_A^4}{\nu_1}+\dfrac{u_B^4}{\nu_2}\right)+\left(\dfrac{1}{\nu_A}+\dfrac{1}{\nu_B}\right)\cdot\dfrac{u_A^2\cdot u_B^2}{u_c^4}\right]$ | (6) | $K(P) = \xi_P\left[1+\dfrac{1}{4\nu_1}\cdot\dfrac{(1+\xi_P^2)u_A^4+4u_A^2\cdot u_B^2}{u_c^4}\right]$ | (7) |
| 3 | $K(P) = \dfrac{\xi_P}{u_c}\left[u_A^2\cdot\dfrac{\nu_A}{\nu_A-2}+u_B^2\cdot\dfrac{\nu_B}{\nu_B-2}\right]^{1/2}$ | (8) | $K(P) = \dfrac{\xi_P}{u_c}\left[u_A^2\cdot\dfrac{\nu_A}{\nu_A-2}+u_B^2\right]^{1/2}$ | (9) |

**Методы с использованием эмпирических формул**

В [8, 9] предлагается использовать следующую формулу при отсутствии доминирующих составляющих:

$$K(P) = \frac{U_A(P)+U_B(P)}{u_A+u_B}, \qquad (10)$$

где $U_A(P) = t(\nu_A, P)\cdot u_A$; $U_B(P) = K_B(P)\cdot u_B$.

В [10] предлагается следующее выражение:

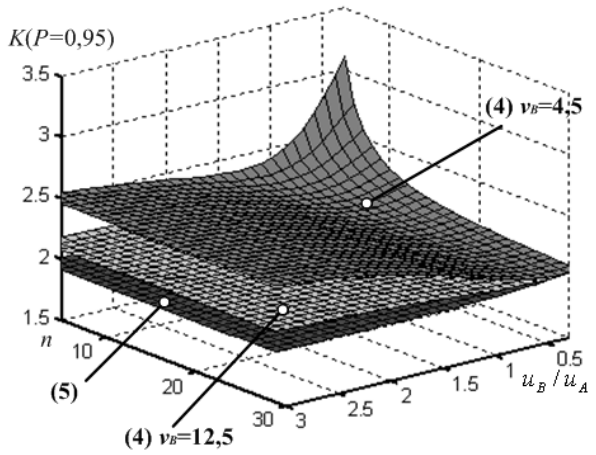
$$K(P) = \frac{\sqrt{U_A^2(P)+U_B^2(P)}}{u_c}. \qquad (11)$$

**Сравнение методов**

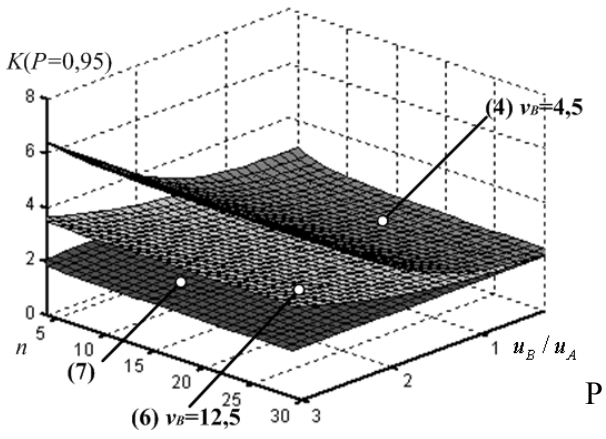
Для сравнительного анализа методов рассмотрим случай наличия составляющей с оцениванием типа А и типа В (с равномерным законом распределения). Оценим число степеней свободы по (2). Т.к. согласно поверочным схемам средства измерений, находящиеся на уровень выше должны иметь погрешность меньше не менее, чем в три раза, «оценкой сверху» будет значение, рассчитанное для числа степеней свободы составляющих с

оцениванием типа B: $\nu_B = 4,5$. При использовании образцового средства измерения в 5 раз точнее: $\nu_B = 12,5$.

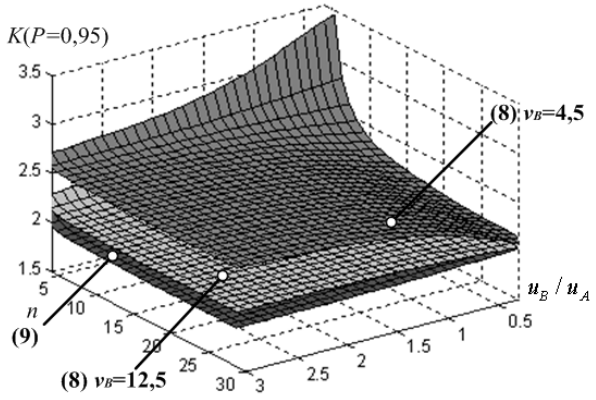
Таким образом получим зависимости для $P$=0,95 по рассмотренным выражениям для $n = [4; 30]$ и соотношения составляющих с оцениванием типа B и типа A $u_B / u_A = [0,3;\ 3]$, что соответствует отсутствию доминирующей составляющей. На рисунках 1–3, показаны результаты для формул (4)–(9).




Ри с.1




Р ис.2




Ри с.3

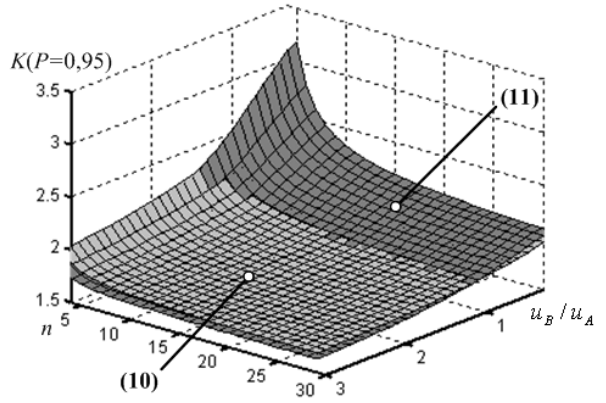



Рис.4

Поскольку, использование противоречивого понятия числа степеней свободы для составляющих с оцениванием типа B, показывает завышенные оценки, его использование должно быть крайне осторожным. Сравнив полученные поверхности с результатами моделирования методом Монте-Карло, получаем, что наиболее близкие результаты дают выражения (9), (10). На рисунке 5 приведены соответствующие кривые для $n$=10.

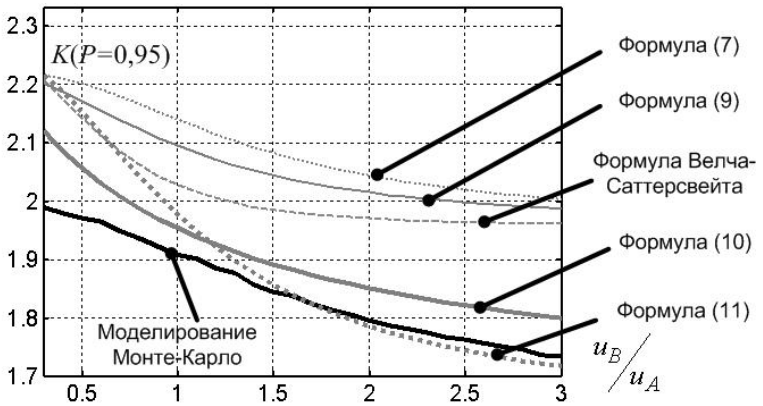



Рис.5. Значения коэффициентов охвата для $n$=10

## Выводы

Рассмотрены методы оценивания покрывающего фактора, противопоставлены классическому GUM–методу. Получены зависимости оценок от числа степеней свободы составляющих с оцениванием типа А в диапазоне от 3 до 30.

Использование формулы Велча-Саттерсвейта возможно двумя путями: при принятии числа степеней свободы составляющих с оцениванием типа В равным бесконечности и при его уточнении. Так, показано, что при использовании «оценивания сверху», что соответствует $\nu_B$=4,5, оценка покрывающего фактора может быть завышенной (до 25%).

Использование аппроксимирующего выражения для формулы Велча-Саттерсвейта дает возможность получать оценки без использования таблиц. Аналогично, предыдущим положениям, возможен вариант учета числа степеней свободы составляющих с оцениванием типа В. При значительной составляющей типа В, данный подход дает неудовлетворительный результат – коэффициент охвата достигает 6.

Простейшая формула для расчета расширенной неопределенности дает значения близкие к рассчитанным по формуле Велча-Саттерсвейта и может применяться на практике.

По результатам моделирования методом Монте-Карло можно сделать вывод о близости значений, основанных на эмпирической формуле (10) к опорным и использование эмпирической формулы задекларированной в отечественных стандартах для объединения погрешностей показало свою применимость, поскольку при доминировании составляющей с оцениванием типа В коэффициент охвата незначительно чувствительным к изменению числа степеней свободы составляющей с оцениванием типа А, что не наблюдается для методов, основанных на использовании числа степеней свободы.

## Список литературы


1. *Циделко В. Д., Яремчук Н. А., Галёвская М. В.* Исследование методов оценивания расширенной неопределенности // Системы обработки информации. – 2008. – Вып. 4 (71). – с. 49–54.
2. *Galovska M.* Interval and fuzzy models of measurement uncertainty// Podstawowe Problemy Metrologii (PPM ’09) – Prace Komisji Metrologii Oddzialu PAN w Katowicach, Poland. – p. 66–71.
3. *Гальовська М.В.* Застосування gh-розподілу для оцінювання розширеної невизначеності//ІІРТК–2009.–НАУ. – с.41–43.
4. JCGM 200:2008 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) – 101 p.
5. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First Edition. – ISO, Switzerland, 1993. – 101 p.
6. *Castrup H.* Note on Type B Degrees of Freedom Equation// ISG Technical Document – www.isgmax.com.
7. *Williams A.* An alternative to the effective number of degrees of freedom// Accreitation Quality Assurance. – Springler–Verlag, 1999 – Issue 4. – p.14–17.
8. ГОСТ 8.207–76 Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения. – М.: Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
9. ДСТУ-Н РМГ 43:2006, Застосування „Руководства по выражению неопределенности”, К., Держспоживстандарт України, 2006. – 20 с.
10. *Захаров И. П.* Основные подходы к оцениванию неопределенности измерений при выполнении метрологических работ//Метрология и метрологическое обеспечение: Сборник материалов Международной научно-технической конференции. – 2009. – Минск: БелГИМ. – с. 32–36

УДК 531.7

*С.В. Уваров, аспирант*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# РАЦИОНАЛЬНЫЙ ВЫБОР ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ВИБРОДИАГНОСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

*В даной статье рассмотрены особенности реализации задачи диагностирования параметров вибрации для вращающегося оборудывания газотранспортной установки. Оценка вибрационных характеристик позволяет определить общее техническое состояние машин.*

## Введение

За последние несколько десятилетий вибрационная диагностика стала основой контроля и прогноза состояния вращающегося оборудования. Физической причиной ее быстрого развития является огромный объем диагностической информации, содержащейся в колебательных силах и вибрации машин, работающих как в номинальных, так и в специальных режимах.

Параметрическая диагностика - это контроль нормируемых параметров оборудования, обнаружение и идентификация их опасных изменений. Системы параметрической диагностики обычно включают в себя несколько каналов контроля различных процессов, в том числе вибрации и температуры отдельных узлов оборудования. Объем используемой вибрационной информации в таких системах ограничен, т.е. каждый вибрационный канал контролирует два параметра, а именно величину нормируемой низкочастотной вибрации и скорость ее нарастания. Обычно вибрация нормируется в стандартной полосе частот от 2(10)Гц до 1000(2000)Гц. Величина контролируемой низкочастотной вибрации не всегда определяет реальное состояние оборудования, но в предаварийной ситуации, когда появляются цепочки быстро развивающихся дефектов, их связь существенно вырастает. Это позволяет эффективно использовать средства аварийной защиты оборудования по величине низкочастотной вибрации. Такие системы чаще всего используются для своевременного обнаружения ошибок персонала, управляющего оборудованием.

Следует отметить, что контроль вибрации машин как в установившихся, так и в переходных (пусковых) режимах работы может осуществляться независимыми специалистами - сотрудниками эксплуатирующего предприятия или сторонних организаций.




**Рис.1** Программа SHOCK для определения частот и коэффициентов затухания собственных колебаний

Современное программное обеспечение для балансировки позволяет: свести к минимуму операции балансировки как жестких, так и гибких роторов; оптимизировать вибрацию машины на нескольких режимах, в том числе и на критических частотах вращения;

обнаруживать и учитывать ошибки оператора при проведении измерений; идентифицировать дефекты.

Основной особенностью программного обеспечения DREAM является поузловой подход к диагностике оборудования с последующим объединением результатов в рамках подготовки диагноза и прогноза состояния машины (агрегата) в целом. К диагностируемым узлам относятся подшипники качения и скольжения, зубчатые и другие механические передачи, проточная часть насосов и компрессоров, электромагнитные системы электрических машин. Такие узлы, как роторы, валы с соединительными муфтами, диагностируются в составе машины с указанными видами подшипников (качения или скольжения).

Прогноз состояния машины (узла) в рамках мониторинга выполняется по результатам построения трендов тех параметров вибрации, которые отвечают за различные цепочки дефектов. Прогноз состояния в рамках диагностики является результатом статистического распознавания класса состояния, в котором находится диагностируемый узел, и учета априорной информации о максимальных скоростях развития дефектов. Предельные длительности достоверного прогноза безаварийной работы типовых машин составляют около 6 месяцев.

Для диагностирования состояния паровых турбин исследовались следующие вибрационные характеристики:

– спектры виброскорости (ускорения, перемещения) в диапазоне 6-16000 Гц (поддиапазоны до 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000, 16000 Гц);

– вибрационные характеристики переходных режимов работы агрегата (функция "старт-стоп") в виде диаграмм Боде, Найквиста (векторной диаграммы), а также траекторий, спектров, временных сигнала в каждый момент времени снятия вибрации на переходном режиме;

– траектории колебаний подшипниковых опор в продольной и поперечной в частотном диапазоне до 500 Гц на стационарном режиме с помощью 2-х позиционных вибродатчиков;

– тренды зависимости вибрационных параметров от времени, которые могут быть представлены в виде 2-х координатных графиков и каскадных спектров.

Указанные характеристики позволяют диагностировать следующие неисправности паровых турбоагрегатов:

– дисбалансы роторов ЦВД, ЦНД, генератора;
– расцентровки ЦВД - ЦНД, турбины-генератора;
– ослабление крепления (потеря жесткости) опорных узлов;
– коробление корпусов турбины;
– заклинивание зубьев гибкой муфты.
– Дефекты подшипниковых узлов:
– разрушение баббита вкладышей;
– увеличенные зазоры ротор-подшипник;
– недостаточный натяг подшипника.

Программное обеспечение системы позволяет расширять перечень указанных неисправностей по мере накопления базы знаний инженерами-диагностами с помощью специального редактора диагностических методик, входящего в состав системы.

При исследованиях в качестве вибрационного параметра использовалась виброскорость (среднее квадратичное значение - мм/с). При исследовании траекторий кроме виброскорости также использовался двойной размах виброперемещения (мм), который получали в режиме интегрирования сигнала виброскорости, предусмотренного в системе ДСА-2001. Датчики устанавливались на корпусах подшипников роторов ЦВД, ЦСД, ЦНД, генератора, возбудителя. В результате спектрального анализа и анализа траекторий колебаний опор выявлено ослабление крепления (разболтанность) переднего подшипника №1 цилиндра высокого давления (ОУП №1) в посадочном месте. Ослабление крепление привел к появлению субгармоник частоты вращения (половинных, полуторных и т.д.).

В процессе измерений выявлена высокая осевая вибрация генератора в районе опорного подшипника №8, превышающая предупредительные уставки. Спектральный анализ и анализ траектории точки измерения опор генератора позволили сделать предположение об ограничении степени свободы вращения ротора генератора в ОУП №7, которое вызывает высокие колебания ротора на его противоположном конце (в плоскости ОП №8).

Также вероятно и то, что динамические усилия от "защемления" ротора в плоскости подшипника №7 вызвали ослабление крепления подшипника №8, что также привело к повышению вибрации опорного подшипника.

Для подтверждения последнего предположения проведен подробного анализа спектра в районе первой роторной гармоники с разрешением 0,063 Гц для разделения сигнала сети переменного тока (50 Гц) и механической составляющей спектра от вращения ротора.

Дефект неуравновешенность ротора приводит к увеличению амплитуды колебаний на частоте вращения ротора. Дифференциальное уравнение движения под действием силы от дисбаланса записывается в виде:

$$a\ddot{q} + h\dot{q} + cq = Q_F(t)$$

где $a$ - коэффициент инерции; h- коэффициент сопротивления системы; $c$ - коэффициент жёсткости системы. Вынуждающая сила от дисбаланса:

$$Q_F(t) = m_0\omega^2(e+r)\cdot\sin\omega t \qquad (2)$$

где$m_0$- масса ротора, кг; $e$- эксцентриситет, м; $r$- смещение оси вращения ротора за счёт упругого прогиба опор, м; $\omega$ - угловая скорость, рад/с. Смещение пропорционально начальному эксцентриситету:

$$r = e/\left[\left(k^2/\omega^2\right)-1\right] \qquad (3)$$

Выражение для определения амплитуды колебаний $A$ и сдвиг фазы $\varphi$ вынужденных колебаний но отношению к фазе возмущающей силы имеет вид:

$$A = \frac{m_0\omega^2 e}{\sqrt{\left(k^2-\omega^2\right)^2 + 4b^2\omega^2}} \qquad tg\beta = \frac{2b\omega}{k^2-\omega^2} \qquad (4)$$

где $k^2 = \frac{c}{a}$ квадрат собственной частоты; $2b = \frac{h}{a}$ - коэффициент демпфирования.

Жесткость опор и коэффициент сопротивления определены экспериментально. В результате исследований получена зависимость величина эксцентриситета ротора (дисбаланса) от амплитуды колебаний *корпуса:*

$$e = 1{,}82\cdot A \text{ или } D = 0{,}68\cdot S \qquad (5)$$

где D - дисбаланс ротора, г/см; S=2A$S = 2\cdot A$- размах колебаний, мкм

Последующая экспериментальная проверка показала адекватность построенной модели.

Экономический эффект от внедрения технологий превентивной диагностики напрямую зависит от основных показателей используемых систем диагностики, к которым относятся:

- номенклатура диагностируемого оборудования;
- вероятность ошибочных диагностических решений (вероятности пропуска аварийноопасных дефектов и ложной тревоги);
- длительность и достоверность долгосрочного прогноза состояния оборудования;

– затраты времени на контроль и прогноз состояния диагностируемого оборудования в течение года;

– объем предварительных исследований (измерений) необходимый для получения заданной достоверности диагноза и прогноза.

Окупаемость лучших систем превентивной вибрационной диагностики вращающегося оборудования обычно не превышает 3-6 месяцев после обучения специалиста-диагноста и подготовки контролируемого оборудования для проведения диагностических измерений.

## Выводы

Применение вибродиагностической системы для газоперекачивающих станций позволяет определять неисправности газотурбинных установок, применяемых в системе, в начальной стадии их развития, осуществлять постоянный вибрационный контроль за развитием неисправностей, проводить профилактику неисправностей, определять оптимальные сроки проведения профилактических работ и устранять возможные аварийные ситуации на ТЭЦ.

## Література

1. Карасев В.А., Ройтман А.Б. Доводка эксплуатируемых машин. Вибродиагностические методы. – М.: Машиностроение, 1986.

2. Вибрационный контроль технического состояния газотурбинных газоперекачивающих агрегатов / Ю.Н. Васильев, М.Е. Бесклетный, Е.А. Игуменцев и др. – М.: Недра, 1987.

3. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. – СПб.: СПбГМТУ, 2000.

4. Акимов В.М. Основы надежности газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1981.

5. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика мониторинг состояния механического оборудования. Ил. 166. Табл.. 12. Библиогр. 276 с. Москва, 1996

6. Русов В.А. Спектральная вибродиагностика. Пермь.1 вып. 1996. 176

УДК 629.7

*В.М. Гречишников, доктор технических наук,*
*Р.К. Мирзаев, кандидат технических наук*
*(Самарский Государственный Аэрокосмический Университет, Россия)*

# КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ СОСТОЯНИЮ

*Излагаются результаты исследования и обосновываются диагностические методы, базирующиеся на специальной обработке и анализе значений параметров полета, зарегистрированных бортовыми самописцами и некоторых других параметров, измеряемых на работающем двигателе. Предлагаются корреляционно-регрессионый анализ с применением метода наименьших квадратов и датчики механических напряжений.*

*Силовая установка, датчики, система регистрации параметров полета, статистическая обработка*

Технология эксплуатации воздушного судна (ВС) по состоянию предполагает переход от традиционно используемых среднестатистических показателей надежности авиационных систем к индивидуальным оценкам их состояния в процессе эксплуатации. Использование подобной технологии на основе новых Руководств УБП ИКАО [1], государственной программы ОБП [3], СУБП Эксплуатанта (должен разрабатываться эксплуатантом используя Глобальный план (Нормы и стандарты) ИКАО. [1,3]) позволит существенно повысить надежность и безопасность полетов, сократить затраты на эксплуатацию, своевременно диагностировать дефекты и неисправности, а главное — принимать обоснованные решения относительно возможности дальнейшего использования конкретного ВС.

Обеспечение безопасности полетов осуществляется за счет непрерывного контроля и диагностики (мониторинг по техническому состоянию) самолетных систем – силовых установок (двигатель и системы), напряженно-деформированного состояния элементов конструкции планера, АО, РЭО и т.д., но из-за отказа которых (ТФ), а также ошибки человека (пилот и др) (ЧФ), внешних влияющих факторов (ВФ) могут быть авария или катастрофа.

На сегодняшний день существует множество научных разработок, посвященных проблемам контроля и диагностики АТ, в частности авиационным ГТД [4-9]. Для проверки функционирования, диагностики и прогнозирования технического состояния на самолетах устанавливаются различные системы индикации, сигнализации работы двигателей и регистрации параметров полета[5].

В настоящее время контроль силовых установок осуществляется следующими методами:

-визуальный осмотр и осмотр с использованием специальных приборов;

-неразрушаюшие методы контроля (ультразвуковой, токовихревой, рентгеновский, проникающих красок и др.);

-контроль продуктов износа узлов трения в масле;

- контроль параметров работы двигателя.

Однако, как показывает практика, в эксплуатации зачастую трудно добиться «адресности» дефектов, в частности в такой сложной динамической многокомпонентной системе, которой является авиационный газотурбинный двигатель (ГТД). Альтернативой здесь являются физические методы диагностики. К основным из используемых и перспективных методов оперативной диагностики ГТД относят:

-диагностику по результатам анализа термогазодинамических параметров;

- диагностику по тепловым параметрам;

- по виброакустическим параметрам;
- трибодиагностику;
- оптика-визуальную диагностику;
- анализ продуктов сгорания;
- измерение выбега ротора.

Здесь всегда возникает вопрос – при каком сочетании методов диагностики можно в короткие сроки «адресно» и достоверно предупредить отказ? Этот вопрос до настоящего времени всесторонне не раскрыт. Имеют место случаи необоснованного съема двигателей с эксплуатации или, что более опасно - пропуск дефектов из-за неправильно поставленного «диагноза» как правило, связанных с погрешностями обработки диагностической информации или сбоя в процессе ее анализа (т.н. человеческий фактор).

Наряду с указанными методами диагностирования ТС ГТД особое место занимают параметрические методы. Под этим названием подразумеваются диагностические методы, базирующиеся на специальной обработке и анализе значений термогазодинамических и некоторых других параметров, измеряемых на работающем двигателе. К числу термогазодинамических параметров относятся давление и температура, расход воздуха и топлива, проходная площадь характерных сечений по газовоздушному тракту двигателя, тяга, частота вращения роторов и т.п. В числе измеряемых других, нетермогазодинамических параметров, можно указать давление и температуру масла, давление топлива, перепад давлений на масляных и топливных фильтрах, спектры вибраций и т.п.

Практика эксплуатации самолетов показывает, что до 60% неисправностей ГТД выявляется по приборным записям параметров в полете [5,6,].

На российских и зарубежных самолетах наибольшее распространение получили магнитные системы регистрации параметров (МСРП). К российским регистраторам такого типа относятся, например, МСРП-12, МСРП-64, МСРП-256 и др. Системы регистрации нового типа МСРП-А (БУР) соответствуют требованиям ARINC-573. В них предусмотрена возможность наращивания конфигурации от базовой до систем расширенной комплектации. Эти системы обеспечивают регистрацию на борту от 50 до 250 параметров с последующим их подробным анализом на *наземных* электронных вычислительных машинах. Зарубежными аналогами являются, например, бортовая система регистрации данных AIDS (Aircraft Integrated Data Recorder System, разработана фирмой Hamilton Standard-США), которая устанавливается на самолетах Боинг-747, DC-10, A310 и регистрирует до 360 параметров сигналов с датчиков, измеряющих температуру, давление, частоту вращения, ускорение, положение рулей управления, расход топлива, вибрации, а также электрические сигналы различных приборов [6,7]. В современных воздушных судах типа Боинг-757 также нашли применение системы FDRS (Flight Data Recorder System), разработанные фирмой AlliedSignal Avionics (США) [5].

Оснащение самолетов нового поколения такими системами регистрации как МСРП-А (А-01, А-02) в комплексе с бортовыми вычислительными машинами позволяет автоматизировать контроль технического состояния и диагностирование систем самолета и силовой установки в полете. С учетом вышеизложенного, процесс оценки ТС ГТД можно проводить в два этапа:

1. Предварительная диагностика, где основными задачами являются определение ТС ГТД в виде "исправен" или "не исправен", а также локализация неисправностей без снятия двигателя с самолета.

2. Дополнительная диагностика ГТД с помощью других средств (оптический, капиллярный, электромагнитный, виброакустический и т.д.).

Обобщая вышеуказанное, можно отметить важность развития первого этапа диагностирования ГТД, где большое значение имеет математическое и информационное обеспечение АС Д. Математическое обеспечение АСД связано с машинной реализацией статистических методов обработки информации, представленных в виде алгоритмов и программ для ПК.

Табл.1 Функциональные возможности бортовых систем контроля двигателей.

| | AIDS EMS | TEM | EDS | СКСУ-32 | БАСК-124 | БСКД-90 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | CF6 | TF-34 | F100 | НК-32 | Д-18Т | ПС-90А |
| | A310 | A10 | F15,F16 | "70" | Ан-124 | Ту-204<br>Ил-96-300 |
| Самоконтроль системы | + | + | + | + | - | + |
| Входной контроль | + | - | - | + | - | + |
| Идентификация режимов работы | + | + | + | + | - | + |
| Сжатие информации | + | - | - | - | - | + |
| Контроль параметров («плавающие пределы») | + | + | + | + | + | + |
| Контроль работы механизации | + | + | + | - | + | + |
| Контроль работы элементов Реверса | - | РУ отсут-ствует | РУ отсут-ствует | - | - | + |
| Учет наработки | + | - | + | - | + | + |
| Анализ тенденций изменения параметров | + | + | + | - | + | + |
| контроль времени выбега роторов | + | - | | - | + | + |
| контроль времени запуска | + | + | - | - | - | + |
| Контроль расхода масла | + | - | - | - | - | + |

Проведенные исследования показывают, что в применяемых методах диагностирования ТС ГТД используются как детерминированные, так и статистические модели. Но в силу ряда вышеуказанных особенностей эксплуатации ГТД, практической и экономической целесообразности статистические модели ГТД находят широкое применение для решения задач диагностирования ТС ГТД.

Таким образом, в качестве функциональных параметров, характеризующих в той или иной мере ТС ГТД, целесообразно использовать весь состав регистрируемых параметров- частоты вращения(числа оборотов) $\mathbf{n_{BJ}}$, $\mathbf{n_{HJ}}$, температура газа за турбиной $\mathbf{T_A}$ , давление топлива $\mathbf{p_T}$, расход топлива $\mathbf{G_T}$, давление масла $\mathbf{p_{Kf}}$, температура масла $\mathbf{T_u}$, вибрации$\mathbf{V_{n0}}$, $\mathbf{V_{30}}$, информативность, которых подтверждается практикой эксплуатации.

Одним из наиболее распространенных методов, применяемых при оценке ТС ГТД, является **корреляционно-регрессионый анализ** с применением метода наименьших квадратов (МНК) [4,5,6]. При этом, в качестве зависимых параметров в установившихся режимах работы двигателя можно рассматривать параметры, характеризующие исправную работу как ГТД, так и его систем. Такими параметрами могут быть частота вращения ротора низкого давления $\mathbf{n_{нд}}$, температура газа на выходе из турбины $\mathbf{T}$, мгновенный расход топлива $\mathbf{G_T}$, давление масла $\mathbf{p_м}$, вибрация передней $\mathbf{V_{n0}}$ или задней опоры $\mathbf{V_{30}}$ .

В данной работе для проведения корреляционного анализа была выбрана модель двигателя в виде:

$$y = a_0 + a_2x_2 + \ldots + a_nx_n$$

где $y$ -выходной (зависимый) параметр, $x_1, x_2x_3, \ldots, x_n$- входные (независимые) параметры.

Следует отметить, что число и характеристики воздействующих на ТС ГТД факторов могут быть разнообразными. В общем, факторы, вызывающие отклонения в работе двигателя, могут быть как внешними, так и внутренними. К внешним факторам можно отнести воздействие окружающей среды (температура, давление, влажность, осадки, примеси в воздухе и т.д.), которые

характеризуют полетные условия. К внутренним факторам относят такие, которые вызывают непосредственно нарушения функционирования систем, обеспечивающих работу двигателя, и потерю усталостной прочности материалов, износа деталей и т.д. Анализ опыта эксплуатации ГТД показывает, что, несмотря на такое распределение, факторы зачастую находятся в сложной зависимости друг от друга.

На основе анализа работы двигателей, эксплуатирующихся в подразделениях ГА можно сделать вывод о том, что указанные факторы могут быть охарактеризоваться следующими параметрами: внешние факторы (условия полета): $H$, $M$, $T^*$ и $p^*$; внутренние факторы: $n_{нд}$, $n_{вд}$, $T$, $G_T$, $p_T$, $p_M$, $T_M$, $V_{по}$ и $V_{30}$.

С целью выявления степени взаимовлияния регистрируемых параметров помощью корреляционного анализа были проанализированы данные полетной информации как исправных, так и неисправных двигателей. Анализу предшествовала проверка законов распределения значений параметров двигателя на нормальность.

## Вывод

Современная идеология в области оценки действий летного состава и технического состояния авиационной техники основана на широком использовании полетной информации, измеряемой и обрабатываемой бортовыми информационными измерительными системами[1,2].

Наибольшую сложность для оценки технического состояния и диагностирования представляют конструкция планера самолета и двигатель. Для них до настоящего времени не были созданы технические средства, обеспечивающие индивидуальный учет расхода ресурса. Эта задача решалась путем периодического визуального осмотра, что представляет трудоемкий и малоэффективный процесс, а результаты осмотра имели очень низкую достоверность. С учетом этого обстоятельства, автором в настоящей работе по комплексной системе обора и обработки полетной информации выделена классификация методов и средств контроля и диагностики при эксплуатации по техническому состоянию, по которым можно выбирать соответствующие аналитические методы и инструментальные средства в зависимости от используемых моделей и реальных сигналов, протекающих в исследуемом объекте. Предпочтение следуют отдавать неразрушающим методам контроля технического состояния (датчики механических напряжений и деформации) и параметрическим методам, одновременное их использование позволяет своевременно выявить неисправности и более точно диагностировать состояние АС. По измеренным данным (зарегистрированным БУР) на основе статистической обработке (по корреляционному анализу) можно прогнозировать техническое состояние объекта, по специальной методике рассчитать ресурсы самолета, уровень БП.

## Библиографический список


1. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП) (Doc 9859-AN/460). Издание первое — 2006 год.— ИКАО, 2006.

2. *Куликовский К.Л .Мирзаев Р.К.* Магнитоупругий датчик механических напряжений в ИИС многопараметрового контроля. Тезисы докладов Всесоюзной нучн. техн. конференции «ИИС-89», г. Ульяновск, 1989, часть 2, 5 с

3. . А.С. 1458761, СССР кл. GOILI/I2 Магнитоупругий датчик– заявка № 4282382/24-10 Заявлено 09.07.87 опубл. 15.02.89. Бюл. № 6 *Мирзаев Р.К. Зарипов М.Ф.,Капцов А.В*. 4 с

4. ГОСТ Р 51898-2002 Аспекты безопасности. Правила включения в стандарты

5. *Кулик Н.С.* Параметрические методы оценки технического состояния авиационных ГТД в эксплуатации. - Киев: КНИГА. 1993. -139 с

6. Журнал "Rolls-Royce. The Magazine", 1999, 3, стр. 26-28. // *« The forensic approach to engine health»*

УДК 621.192

*М.Б. Милешкин, канд. техн. наук, И.В. Библик*
*(Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина)*

# ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ АВИАЦИОННЫХ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

*Рассматривается возможность применения компьютерного моделирования в рамках специального расчетно-экспериментального метода для оценки надежности авиационных баллонов высокого давления по модели «нагрузка – несущая способность».*

Одной из важнейших задач обеспечения безопасной эксплуатации баллонов высокого давления является оценка их надежности.

Многообразие типов, особенности конструкции и условий эксплуатации, а также высокие требования к надежности предъявляют соответствующие требования и к процедурам контроля технического состояния при массовом обслуживании авиационных баллонов. Но до настоящего времени самым распространенным, а зачастую и единственным методом контроля технического состояния баллонов является периодическое освидетельствование (испытание) пробным давлением и визуальный осмотр.

При проведении контроля технического состояния баллонов актуальной задачей является достоверное и своевременное обнаружение дефектов различной природы, контроль за их развитием и изъятие баллонов с дефектами из эксплуатации.

При высоком расчетном коэффициенте запаса прочности (обычно 2,5 – 3) часть баллонов имеет производственно-технологические и приобретенные в процессе эксплуатации дефекты, значительно снижающие их запас надежности. Выработка ресурса связана главным образом с накоплением необратимых повреждений в процессе эксплуатации.

Отказы баллонов, особенно их разрушение, могут иметь чрезвычайно тяжелые последствия.

В настоящей работе рассматривается возможность применения компьютерного моделирования в рамках специального расчетно-экспериментального метода (РЭМ) [1] для оценки надежности комбинированных баллонов по модели «нагрузка – несущая способность (прочность)» [2], на основе которой может быть решена значительная часть задач о прогнозировании показателей надежности элементов конструкций.

В РЭМ модель материала представляет собой массив структурных элементов с распределенными свойствами. При этом за основную характеристику структурного элемента принимается его предельная деформативность, т.е. деформация, при достижении которой этот структурный элемент разрушается.

Для определения характеристик надежности объектов по модели «нагрузка – несущая способность» предполагается, что нагрузка $S$ представляется стационарным случайным процессом, а несущая способность $R$ – нестационарным случайным процессом с монотонно убывающим математическим ожиданием [1]

$$m_S(t) = m_{S0},\ \sigma_S(t) = \sigma_{S0},\ A_S = \sigma_{S0} / m_{S0}, \tag{1}$$

$$R(t) = R_0 \cdot \varphi(t),\ m_R(t) = m_{R0} \cdot \varphi(t),\ \sigma_R(t) = \sigma_{R0} \cdot \varphi(t),\ A_R = \sigma_{R0} / m_{R0}, \tag{2}$$

где $R_0, S_0$ – случайные величины несущей способности и нагрузки в начальный момент времени $t_0$;

$m$ – математическое ожидание;

$\sigma$ – среднеквадратическое отклонение;

$\varphi(t)$ – функция «усталости».

Случайные величины $S(t)$ и $R(t)$ распределены по нормальному закону распределе-

ния, наиболее распространенному при расчетах надежности с использованием модели «нагрузка – несущая способность».

Вид функции «усталости» $\varphi(t)$ зависит от характера процессов старения, протекающих в материале конструкции под действием эксплуатационных нагрузок (коррозия, эрозия, усталость и др.) и фактически определяет время безотказной работы объекта.

Для оценки влияния старения на долговечность, безопасность и экономическую эффективность оборудования в рамках модели «нагрузка – несущая способность» необходимо решать задачу нахождения аналитического вида функции «усталости», поскольку знание вида и параметров функции «усталости» позволяет с большой достоверностью определять ресурс оборудования. Функция «усталости» является непрерывной монотонно убывающей функцией, при этом $\varphi(t=0)=1$ и $\lim\limits_{t\to\infty}\varphi(t)=0$.

При такой модели надёжности объекта вероятность безотказной его работы за время $t$ выражается формулой [1]

$$P(t)=\frac{1}{2}+\Phi\left[\frac{\eta(t)-1}{\sqrt{A_R^2\eta^2(t)+A_S^2}}\right], \tag{3}$$

где $\eta(t)$ - функция изменения коэффициента запаса во времени

$$\eta(t)=\frac{m_R(t)}{m_S(t)}=\frac{m_{R0}}{m_{S0}}\varphi(t)=\eta_0\varphi(t), \tag{4}$$

$A_R$, $A_S$ – коэффициенты вариации несущей способности и нагрузки;

$\Phi(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int\limits_0^x e^{-x^2/2}dx$ – функция Лапласа.

Вероятность отказа за время $t$ определяется выражением

$$q(t)=1-P(t). \tag{5}$$

В качестве исходных данных для расчета вероятности безотказной работы (ВБР) $P(t)$ объекта по формуле (3) используются результаты прочностных расчетов объекта; характеристики случайных процессов $S(t)$ и $R(t)$; функция "усталости" $\varphi(t)$, получаемая в результате статистического моделирования процесса разрушения материала; таблица значений функции Лапласа.

Эксплуатация конструкции по ее фактическому состоянию возможна при решении двух основных проблем: надежной оценки текущей поврежденности физическими методами контроля состояния материала и прогноза развития текущей поврежденности на базе различных прогнозных моделей развития деградационных процессов в конструктивных элементах.

Как было показано ранее [3,4], РЭМ позволяет моделировать «промежуточную поврежденность» и оценивать ее влияние на прочностную надежность при усталостном и длительном статическом нагружении. Для построения функции «усталости» с помощью РЭМ, представляющей собой изменение степени поврежденности материала элемента конструкции в процессе его эксплуатации, необходимы сведения о нормированном сроке службы и об условиях нагружения (эксплуатации). При этом под поврежденностью в РЭМ подразумевается число разрушенных структурных элементов в процессе нагружения.

Рассмотрим случай многоразового применения комбинированных баллонов в различных системах самолетов и вертолетов, которое предполагает многоцикловое нагружение изделия.

Расчеты проводились для комбинированного баллона, состоящего из стеклопластиковой оболочки и стального лейнера. Оболочка из стеклопластика радиусом 140 мм состояла из четырех слоев толщиной 1,0 мм (двух кольцевых и двух спиральных с углом намотки спиральных слоев 45°). Материал лейнера с толщиной стенки 2,3 мм – сталь 07Х16Н6 (предел прочности – 1150 МПа, предел текучести – 850 МПа, относительное удлинение при разрыве – 12 %). Наружный диаметр баллона 140 мм, объем 7 л. Рабочее давление 29,4 МПа (300 кгс/см$^2$). Коэффициент запаса прочности – 2,6.

Расчет проводился с учетом совместной работы стального лейнера и стеклопластиковой оболочки [5]. На рис. 1 представлена зависимость числа разрушенных структурных элементов $N$ в модели материала РЭМ для стеклопластиковой оболочки при нагружении баллона внутренним давлением. Компьютерное моделирование механического поведения баллона показало хорошее совпадение с разрушающим давлением баллона (79 МПа в соответствии с коэффициентом запаса прочности).

На рис. 2 приведена функция „усталости” для этого же комбинированного баллона в зависимости от времени, отнесенного к сроку службы ($t_{отн}$).

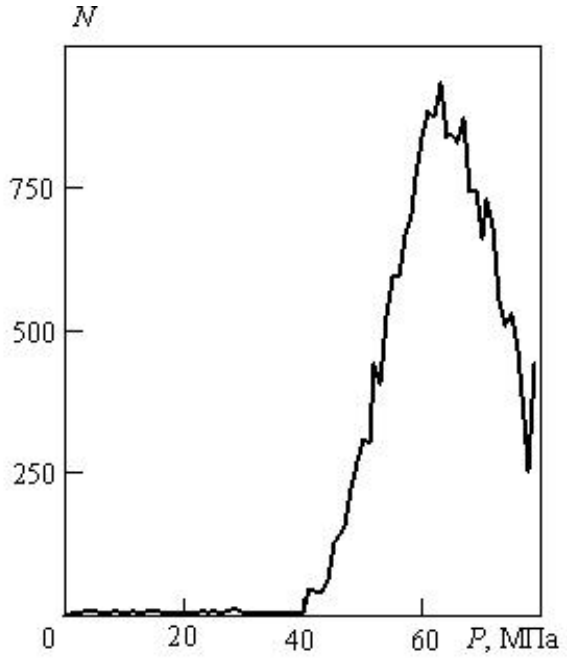



Рис. 1.

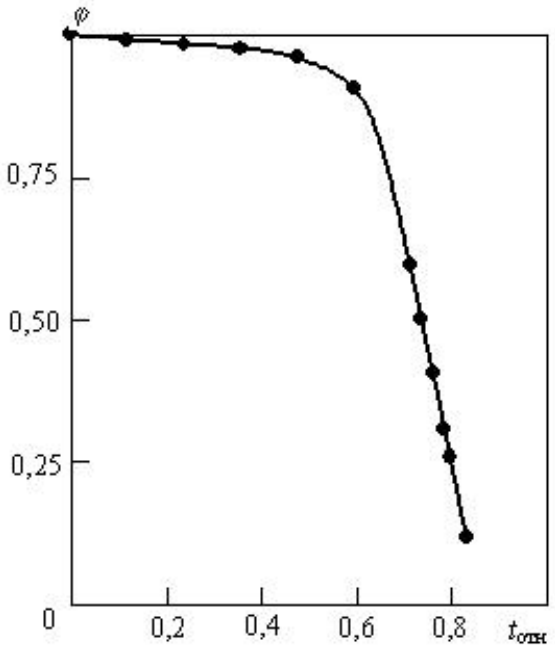



Рис.2.

Функция «усталости» была получена для определения ВБР комбинированного баллона по формуле (3). Коэффициенты вариации нагрузки ( $A_S$ ) и несущей способности ( $A_R$ ), определяемые как отношение соответствующих среднеквадратических отклонений к математическим ожиданиям обычно находятся в диапазоне 0,01 – 0,4 [2]. С помощью РЭМ была проведена оценка несущей способности рассматриваемых баллонов, как случайной величины, в результате которой оказалось, что коэффициент $A_R$ может быть принят равным 0,1. Поэтому для оценки влияния значения коэффициента вариации нагрузки на ВБР баллонов были проведены расчеты для двух случаев: $A_S = A_R = 0{,}1$ и $A_R = 0{,}1, A_S = 0{,}05$.

Результаты расчетов приведены в таблице 1. Значения ВБР приведены для $t_{отн} > 0{,}7$, поскольку для $t_{отн} < 0{,}7$ вероятность отказа, определяемая по формуле (5), $< 10^{-8}$.

Из приведенных результатов видно, что уменьшение $A_S$ приводит к достаточно существенному изменению ВБР баллонов. Поэтому для более реалистичного определения ВБР необходимы сведения об эксплуатационных условиях нагружения баллонов.

При определении ресурса комбинированного баллона необходимо учитывать требования, предъявляемые к уровню его безопасности, согласно которым определяется допустимое

значение вероятности его безотказной работы $P_{доп}$. По кривой надежности комбинированного баллона, зная допустимое значение ВБР, можно определить его ресурс.

*Таблица 1*

Результаты расчётов ВБР комбинированного баллона

| Длительность прогноза, отнесенная к сроку службы, $t_{отн}$ | ВБР при $A_S = A_R = 0,1$ | ВБР при $A_R = 0,1, A_S = 0,05$ |
|---|---|---|
| 0,714 | 0,9999 | 0,99997 |
| 0,738 | 0,9987 | 0,99966 |
| 0,762 | 0,9834 | 0,9934 |
| 0,786 | 0,8413 | 0,8944 |
| 0,798 | 0,6443 | 0,6750 |

Естественно, что применение методов неразрушающего контроля для оценки фактического состояния стеклопластиковой оболочки, по крайней мере при испытании баллона пробным давлением, позволит более точно определить функцию «усталости», а следовательно и надежность комбинированного баллона.

## Выводы

1. Специальный расчетно-экспериментальный метод, основанный на имитационном компьютерном моделировании процесса разрушения материалов и элементов конструкций, позволяет определять изменение степени поврежденности комбинированных баллонов по известным условиям нагружения и получать функцию «усталости» в аналитическом виде, тем самым определяя надежность комбинированных баллонов по модели «нагрузка – несущая способность».

2. Установлено, что РЭМ позволяет по допустимому значению вероятности безотказной работы определять ресурс комбинированных баллонов.

3. Точность определения надежности комбинированных баллонов может быть существенно увеличена при наличии данных о фактическом состоянии материалов баллонов в процессе эксплуатации.

## Список литературы


1. *Милешкин М.Б., Библик И.В.* Новый метод исследования особенностей механического поведения материалов и оценки прочностной надежности элементов конструкций // Надежность и долговечность машин и сооружений. – Киев, 2006. – Вып. 26. – С. 302-310.

2. *Острейковский В. А.* Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288 с.

3. *Милешкин М.Б., Библик И.В.* Применение специального расчетно-экспериментального метода для оценки остаточного ресурса элементов конструкций по фактическому состоянию материала // Надежность и долговечность машин и сооружений. – Киев, 2006. – Вып. 27. – С. 304-310.

4. *Милешкин М.Б., Библик И.В.* Применение компьютерного моделирования для прогнозирования длительной прочности лопаточных жаропрочных сплавов // Вестник двигателестроения. – 2008. – С. 111-115.

5. Пат. 85422 Україна, МПК(2009) F17C 1/00, G01N 3/00. Спосіб визначення міцності комбінованих балонів / *Мілешкін М.Б., Біблік І.В.* (Україна); Інститут проблем машинобудування НАН України (Україна). – № а 2007 00389; Заявл. 15.01.2007; Опубл. 26.01.2009. – 4 с.

УДК 004.056.5(045)

*Б.Є. Журиленко, кандидат фізико-математичних наук, доцент,*
*З.О. Самосуд, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ПОШУК РАДІОЗАКЛАДНИХ ПРИСТРОЇВ ЗА ДОПОМОГОЮ ЗВУКУ

*В статті розкривається сутність удосконаленого методу пошуку радіозакладних пристроїв. Описується пристрій для вимірювання відстані за допомогою звуку, який визначає відстань до джерела перехоплення мовного сигналу і вказує напрямок до закладного пристрою.*

Сучасні електронні пристрої перехоплення інформації або так звані радіозакладні пристрої (РЗП), які використовують радіоканал як середовище передачі небезпечних сигналів, є одним з найбільш поширених технічних засобів, що використовуються для несанкціонованого отримання інформації. Їх основним місцем застосування є внутрішні приміщення об'єктів і закладів як державного призначення, так і комерційних структур. Виявлення і вилучення цих пристроїв представляє собою окреме і дуже складне завдання в системі заходів щодо захисту інформації.

Визначення місцезнаходження РЗП може виконуватись візуально, а також з використанням спеціальної апаратури: детекторів диктофонів і відеокамер, індикаторів поля, радіочастотовимірювачів та інсепторів, сканерних приймачів і аналізаторів спектру, програмно-апаратних комплексів контролю, нелінійних локаторів, рентгенівських комплексів, звичайних тестерів, а також спеціальної апаратури для перевірки ліній зв'язку і т.ін.

В ході патентного пошуку виявлено, що також існує велика кількість запатентованих методів визначення дальності, локалізації сторонніх засобів випромінення "небажаних" сигналів, способів та систем стеження за ціллю, радіолокаційно-оптичних пристроїв та пристроїв автоматичного виявлення сигналів. Відоме проведення безконтактних вимірів за допомогою виміру часу проходження ультразвуку пристроєм для вимірювання відстані за допомогою ультразвуку за патентом UA 37232C2 кл. G 01 S 7/52, 15/10 бюл. № 4 опубл. 15.05.2001. Пристрій для вимірювання відстані за допомогою ультразвуку складається з передавача і приймача, які виконані у вигляді єдиного ультразвукового перетворювача та пристрою обробки сигналів, який у свою чергу містить граничний перемикач порогів із змінним порогом переключення, аналогово-цифровий перетворювач та мікрокомп'ютер.

Пристрій для вимірювання відстані за допомогою ультразвуку вимірює відстань до джерела акустичного сигналу, але не вказує напрямок до закладного пристрою.

В основу досліджуваного пристрою поставлено задачу удосконалити його для вимірювання відстані за допомогою звуку шляхом введення нових конструктивних блоків, що забезпечить визначення напряму та відстані до закладного пристрою.

Оскільки акустичний сигнал діє безпосередньо на мікрофон РЗП, то пошук прослуховуючих пристроїв може визначатися по часу затримки акустичного сигналу, тобто часу пропорційно відображеному у відстань.

Сутність методу акустичної локації полягає в реєстрації акустичних сигналів за допомогою звукових датчиків при цьому відстань до об'єкту фіксується по часу проходження сигналу до об'єкту. Якщо відома швидкість і час розповсюдження акустичного сигналу, то можна визначити відстань до об'єкту. Для пошуку закладного пристрою використовується той же принцип з використанням тестового акустичного імпульсного сигналу.

В основу приладу пошуку закладних пристроїв поставлено задачу удосконалити пристрій для вимірювання відстані за допомогою звуку шляхом введення нових

конструктивних блоків, що забезпечить визначення напряму та відстані до закладного пристрою.

Структурна схема установки для пошуку радіозакладного пристрою представлена на рисунку 1.

Імпульсний генератор (ІГ) генерує імпульсний сигнал, який подається на акустичну систему (АС). В момент початку імпульсу з ІГ на вхід "*X*" осцилографа (О) подається сигнал синхронізації. АС випромінює імпульс звуку ізотропно в усіх напрямках.

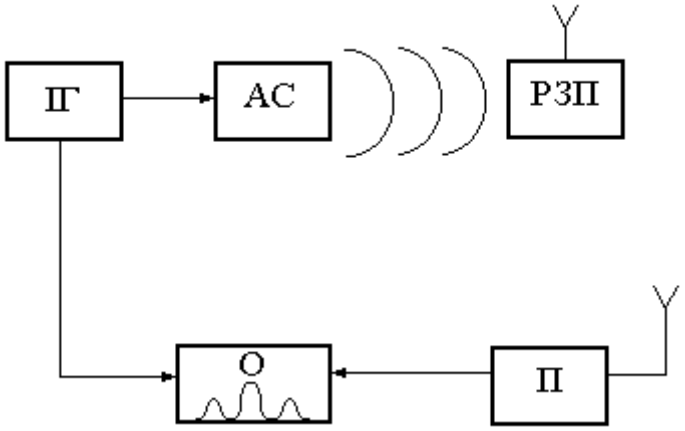



Рис. 1. Структурна схема установки для пошуку радіозакладного пристрою

За наявності в приміщенні радіозакладного пристрою (РЗП), акустичний сигнал буде надходити до нього з певною затримкою. Далі акустичний сигнал з допомогою РЗП перетворюватиметься в інформаційний електромагнітний сигнал і випромінюватимеся в ефір. Приймач (П), який налаштований на частоту випромінювання РЗП, буде приймати електромагнітний інформаційний сигнал. Електромагнітний сигнал за допомогою детектора приймача буде перетворюватися в імпульсний сигнал і подаватися на вхід "*y*" осцилографа.

В цьому випадку на екрані О буде спостерігатися імпульс з затримкою від початку розгортки. Затримка на екрані О буде складатися з затримки при розповсюджені акустичного сигналу від АС до РЗП і розповсюдження радіосигналу від РЗП до приймача. Оскільки час розповсюдження електромагнітних хвиль по ефіру малий, то основний час затримки буде відповідати часу розповсюдження акустичного сигналу . Якщо час затримки помножити на швидкість акустичної хвилі, то отримаємо відстань від акустичної системи до РЗП.

При переносі АС в іншу точку можемо експериментально визначити відстань до РЗП. Провівши експериментальні виміри відстані до РЗП з різних точок, можемо знайти місцеположення РЗП. Схема визначення місця розташування радіозакладного пристрою представлена на рисунку 2.

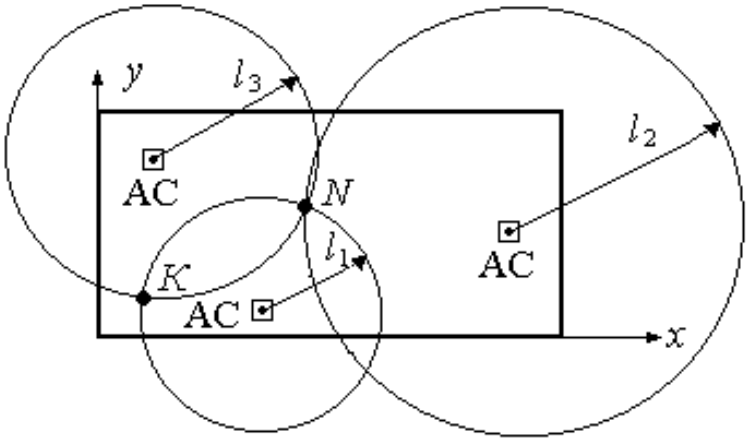



Рис. 2. Схема визначення місця розташування радіозакладного пристрою

Отримавши значення тривалостей затримки акустичного сигналу з різних точок приміщення, координати яких задамо відповідно до координат приміщення, можна визначити радіуси кіл, що утворюються внаслідок дії джерел акустичних сигналів в певній точці. Для цього застосуємо звичайну формулу визначення тривалості затримки розповсюдження акустичного сигналу за допомогою відомої величини – швидкості звуку, що дорівнює $V_{зв} = 340$ м/с:

$$\tau = \frac{\ell}{V_{зв}}, \tag{1}$$

де $\ell$ – відстань від АС до РЗП.

Звідки радіус розповсюдження акустичної хвилі визначатиметься, як

$$\ell = \tau \cdot V_{зв}. \tag{2}$$

Складемо план приміщення у масштабі і позначимо місця розташування акустичних систем (Рис. 2.). Оберемо три довільні точки у приміщенні, щоб виключити невизначеність розташування РЗП в точці *K*. За допомогою формули (2) розрахуємо відстані від АС до РЗП, які будуть дорівнювати радіусам кіл з центром в точці розташування АС.

$$\begin{aligned} \ell_1 &= \tau_1 \cdot V_{зв}; \\ \ell_2 &= \tau_2 \cdot V_{зв}; \\ \ell_3 &= \tau_3 \cdot V_{зв}. \end{aligned} \tag{3}$$

Місце знаходження радіозакладного пристрою визначиться точкою *N* перетину отриманих кіл.

У разі неможливості проведення пошуку прослуховуючих пристроїв безпосередньо в досліджуваному приміщенні, продовжувати застосовувати метод акустичної локації можна без жодних вагань (за умови, що стіни та міжкімнатні перегородки не оснащені спеціальними звукоізолюючими матеріалами та тими, що не пропускають радіовипромінень). Адже, у випадку розташування РЗП в іншому приміщенні, точка перетину концентричних кіл буде зображена поза досліджуваним приміщенням. Точно місце розташування РЗП відображено не буде, але напрямок в якому знаходиться джерело радіовипромінень можна визначити.

Існує безліч способів маскування РЗП під предмети повсякденного вжитку та конструктивного виконання, що значно ускладнює їх пошук, але в будь-якому разі прослуховуючий пристрій містить чутливий елемент, що реагуватиме на дію тестових акустичних сигналів. Оскільки акустичний сигнал діє безпосередньо на мікрофон РЗП, то

пошук прослуховуючих пристроїв може визначатися по часу затримки акустичного сигналу, тобто часу пропорційно відображеному у відстань.

Для підвищення точності локалізації закладки звукові динаміки необхідно встановлювати в різних площинах і визначати її місцезнаходження на об'ємній (тривимірній) схемі приміщення.

Помилка вимірювання відстані до РЗП буде визначатися формою тестового імпульсу (крутизною переднього фронту) і принципом побудови (функціонування) блоку порівняння. Для підвищення точності вимірювань використовуються імпульси зі складним видом модуляції (наприклад, з лінійною частотною модуляцією) і спеціальні пристрої їх обробки, що забезпечують стискання імпульсу після обробки.

Помилка вимірювань із застосуванням сучасних пристроїв для реалізації методу акустичної локації складає 10…20 см.

В кожному конкретному випадку методологія визначення місцезнаходження радіозакладки змінюється (що і є основним підґрунтям експериментальних досліджень), але технологія та принципи досліджуваного методу незмінні для кожного з них і в будь-якому випадку призводять до бажаного результату та поставленої мети.

## Висновки

Спосіб визначення місцезнаходження закладних пристроїв, який використовує описаний пристрій пошуку належить до пошукової техніки, що застосовується в системах захисту інформації та може бути використаний для вимірювання відстані до закладного пристрою та вказувати його місце розташування. Досвід використання існуючих приладів пошукової техніки свідчить про те, що лише даний пристрій володіє необхідною функцією визначення конкретної точки місця розташування закладного пристрою, чим значно полегшує процедуру локалізації таких не потрібних закладок.

## Список літератури

*1. Торокин А.А.* Основы инженерно-технической защиты информации. – М.: изд-во "Ось-89", 1998. – 331 с.

*2. Хореев А.А*. Способы и средства защиты информации: Учеб пособие. – М.: МО РФ, 1999. – 316 с.

*3. Максименко Г.А., Хорошко В.А.* Методы выявления, обработки и идентификации сигналов радиозакладных устройств. – К.: ООО "ПолиграфКонсалтинг", 2004. – 317 с.

УДК 004.056:14(045)

*В.С. Василенко, кандидат технічних наук, доцент,*
*О.В. Дубчак, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ КОНТРОЛЬНОЇ ОСНОВИ ДЛЯ ЗАВАДОСТІЙКИХ КОРЕГУЮЧИХ КОДІВ

*Розглянуто вимоги щодо величини контрольної основи в задачах захисту цілісності інформаційних об'єктів телекомунікаційних мереж та основні способи (механізми) забезпечення цілісності інформації в умовах застосування узагальненого коду умовних лишків.*

При використанні в завадостійкому кодуванні системи лишкових класів (СЛК) в класичному вигляді чи у вигляді коду умовних лишків (ЛУ–коді) [1] постає традиційна для задач цього класу проблема розрізняння невикривлених кодових комбінацій (чисел, базових кодових слів) від викривлених. Відомо, що в цих системах кодова комбінація розглядається як деяке число. В зазначених умовах невикривленими вважаються такі числа, величина яких не перевищує наперед визначеного діапазону представлення невикривлених чисел робочого діапазону $P = \prod_{i=1}^{n} p_i$, де $p_i \ (i = 1,2,\ldots,n)$ – основи системи числення, обрані для даної системи представлення. В цих кодах, як і в інших кодах для завадостійкого кодування, вводиться надлишковість у вигляді реального чи умовного лишку від розподілу вихідного числа $A$ на контрольну основу $p_k$ (чи $q$). Її введення приводить до розширення діапазону представлення числа до величини $R = P \cdot p_k = P \cdot q$. При цьому природно вважається, що викривлені числа $\widetilde{A}$, на відміну від невикривлених, зосереджені за межами робочого діапазону, тобто $\widetilde{A} > P$. При виборі чи визначенні елементів системи числення в СЛК важливою задачею є вибір таких основ цієї системи, які б забезпечили просте і надійне виявлення факту викривлення, а в корегуючих кодах – як місця, так і величин можливих викривлень в базових кодових словах. Що стосується вибору основ, які створюють робочий діапазон, то вимога до них одна – ці основи повинні бути взаємно простими числами.

*Вибір величин контрольної основи в задачах контролю цілісності.*

Оскільки, за визначенням, викривлені числа задовольняють умові $\widetilde{A} > P$, то для задач контролю наявності викривлень звідси неважко визначити величину контрольної основи цієї системи. Отже, для виявлення наявності викривлень досить визначити, в якому з діапазонів - робочому чи контрольному - знаходиться число, правильність якого перевіряється. Для цього слід вимагати, щоб викривлення лишку, тобто символу початкового числа $A$, по будь-якій основі, наприклад, по основі $p_i$, збільшувало б початкове невикривлене число ($A < P$) $A = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, ..., \alpha_i, ..., \alpha_n, \alpha_k$ на величину, яка забезпечує вихід викривленого числа в контрольний діапазон, тобто на величину $\Delta A = l_i \cdot R_i = 0,0,0,...,\Delta\alpha_i,...,0,0 > P$.

Тоді, за рахунок цього, викривлене число $\widetilde{A} = A^{/} = A + l_i \cdot R_i = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, ..., \widetilde{\alpha}_i, ..., \alpha_n, \alpha_k$, перейде з початкового діапазону $[0, P)$ в контрольний діапазон (див. рис. 1), наприклад, в діапазон $[l_i \cdot R_i, \ (l_i + 1) \cdot R_i)$ величиною $R_i = P \cdot q / p_i$. Таким чином буде забезпечена умова $l_i \cdot R_i = l_i \cdot P \cdot q / p_i > P = P \cdot q / q$.

Звідси витікає $l_i / p_i > 1/q$, а отже, при найменшому значенні $l_i = 1$, випливає $q > p_i$, тобто умовою однозначного визначення наявності викривлень є перевищення величиною контрольної основи величини будь-якої з інших основ. В останніх виразах: $\Delta A$ – величина викривлення; $\alpha_i$ – значення невикривленого символу (лишку за основою з номером $i$); $l_i$ – номер інтервалу, в який потрапляє число, викривлене за основою з номером $i$; $R_i = P \cdot q / p_i$ –

величина даного інтервалу; $\widetilde{\alpha}_i = (\alpha_i + \Delta\alpha_i) \bmod p_i$ – значення викривленого символу, $\Delta\alpha_i$ – величина викривлення $i$-го символу.

*Вибір величин контрольної основи в задачах контролю та поновлення цілісності.*

Зрозуміло, що в задачах контролю та поновлення цілісності недостатньо лише встановити факт наявності порушення цілісності інформаційного об'єкту, а потрібно визначити місце викривлення та його величину. Для вирішення задач виявлення місця та величин викривлень необхідно забезпечити ідентифікацію викривленого числа або величини викривлення з номером основи ($i$ або j), за якою таке викривлення має місце, та визначення величини цього викривлення (відповідно $\Delta\alpha_i$ чи $\Delta\alpha_j$, де $i, j$ - номери основ у нашому прикладі). Для цього можна використати той факт, що аналогічне викривлення за основою $p_j$ переводить викривлене число

$$\widetilde{A} = A'' = A + l_j \cdot R_j = \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, ..., \widetilde{\alpha}_j, ..., \alpha_n, \alpha_k ,$$

у діапазон [$l_j \cdot R_j$, $(l_j + 1) \cdot R_j$) величиною $R_j$ (див. рис. 1).

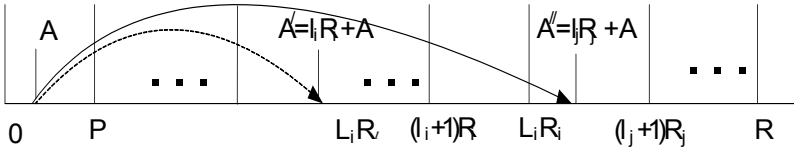



Рис. 1. До виходу викривленого числа за межі робочого діапазону

З наведеного витікає, що механізми визначення наявності, місця виникнення та величини викривлення повинні ґрунтуватися на виявленні тим чи іншим шляхом хоча б однієї з таких взаємно пов'язаних величин, як $i$, $p_i$, та, відповідно, $\Delta\alpha_i$, $l_i$, $R_i$, $\Delta A$. З наведеного витікає також, що для ідентифікації викривленого числа чи величини викривлення з номером основи $i$ слід забезпечити попадання викривлених за різними основами чисел в різні діапазони, що, в свою чергу, є можливим за умови, що відстань між двома довільними діапазонами, в які можуть потрапити викривлені числа, перевищувала б максимальне значення невикривленого числа ($P$). Наприклад, при $l_i \cdot R_i > l_j \cdot R_j$ (при зворотному співвідношенні результат не зміниться):

$$l_i \cdot R_i > l_j \cdot R_j + P, \text{ чи } (l_i \cdot R_i - l_j \cdot R_j) > P . \qquad (1)$$

Звідси:

$$l_i \cdot P \cdot q / p_i - l_j \cdot P \cdot q / p_j > P ;$$

$$l_i \cdot q / p_i - l_j \cdot q / p_j > 1 ; \qquad q(l_i / p_i - l_j / p_j) > 1 ;$$

$$q > 1/(l_i / p_i - l_j / p_j) = p_i \cdot p_j / (l_i \cdot p_j - l_j \cdot p_i) .$$

Оскільки шукане значення контрольної основи повинно перевищувати величину, яка визначається дробовим числом, то для пошуку максимального значення цієї величини слід визначити максимальне значення чисельника та мінімальне значення знаменника. Максимальне значення чисельника в цьому виразі дорівнює добутку двох найбільших з основ системи числення $p_n \cdot p_{n-1}$, а мінімальне значення знаменника (це цілочислена величина!)

$$l_i \cdot p_j - l_j \cdot p_i = 1 ,$$

оскільки дорівнювати нулю знаменник може лише тоді, коли $l_i \cdot p_j = l_j \cdot p_i$, що, в свою чергу, є досяжним лише при $l_i = p_i$, а $l_j = p_j$, що є неможливим (нагадаємо, що основи системи числення, наразі це величини $p_i$ *та* $p_j$, є взаємно простими числами). Отже, в разі

визначення величини та місця викривлення за фактом попадання викривленого числа до інтервалу $l_i$ чи $l_j$, вимога до величини контрольної основи може бути записаною у вигляді:

$$q > p_n \cdot p_{n-1}. \tag{2}$$

Один з відомих механізмів, що реалізує так званий $z$ – алгоритм [1], як раз і використовує той факт, що оскільки величина первинного числа завжди є величиною меншою, ніж $P$, тобто $A \le P$, то й відстань між викривленим числом $\tilde{A}$ і лівою межею $l_i \cdot R_i$ діапазону, в який це викривлене число потрапило, також є величиною меншою ніж $P$. Наприклад, для випадків, відображених на рис. 1:

$$A^{/} - l_i \cdot R_i \le P; \qquad A^{//} - l_j \cdot R_j \le P. \tag{3}$$

Оскільки в системах нерівнянь (3) справедливими є тільки нерівняння для однієї основи $p_i$, а отже і для одного значення $l_i$, де – $i$ номер інтервалу, в який потрапляє число, викривлене по цій основі з номером, то цей факт дозволяє однозначно визначити і місце, і величину викривлення та здійснити, в подальшому, корегування викривлення.

Інший з механізмів [2] - механізм на основі так званої нулізації – використовує факт переходу викривленого числа з початкового діапазону $[0, P)$ в деякий інший діапазон, величиною $P$ (див. рис. 2), наприклад, в діапазон $[k \cdot P,\ (k+1) \cdot P)$ чи в діапазон $[s \cdot P, (s+1) \cdot P)$. Цей механізм шляхом визначення так званого мінімального числа $T$, наприклад для випадків, представлених на рис. 2, величиною $T = l_i \cdot R_i + A - k \cdot P$ чи $T = l_j \cdot R_j + A - s \cdot P$, дозволяє визначити ліву межу діапазону ($k \cdot P$ чи $s \cdot P$) і здійснити, в подальшому, корегування визначеного викривлення [3].

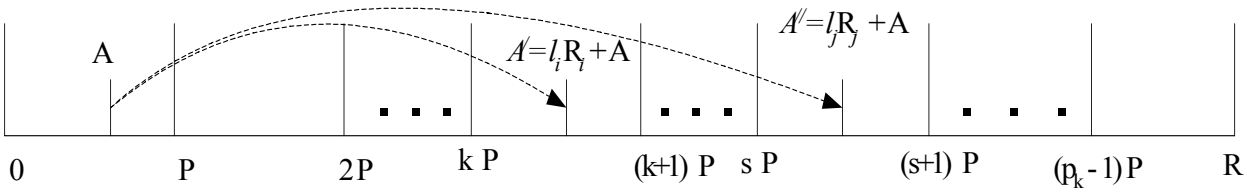



Рис. 2. До виходу викривленого числа за межі робочого діапазону

При цьому виникає питання, чи можна забезпечити також, щоб число з будь-якими викривленнями, що можуть виникнути в лишках за одною з довільних основ $p_i$ величиною $l_i \cdot R_i$, завжди відрізнялося від значення, яке має ліва межа інтервалу, наприклад $k \cdot R_k$, де $R_k = P$? Зрозуміло, що для цього слід забезпечити виконання умови:

$$\{l_i \cdot R_i - k \cdot P\}_{R_i} > P. \tag{4}$$

З виразу (4) витікають дві нерівності. Перша із них при $k \cdot P < l_k \cdot R_k$ має вигляд:

$$l_i \cdot R_i - k \cdot P > P.$$

Звідси:

$$l_i \cdot q / p_i - k > 1;$$
$$l_i \cdot q - k \cdot p_i > p_i;$$
$$q > (k+1) \cdot p_i / l_i.$$

Як і раніше, при максимальному значенні чисельника, яке досягається при $(k+1) = q$, $p_i = q$ і мінімальному значенні знаменника $l_i = 1$, отримаємо $q > q^2$, що є неможливим.

Друга з нерівностей при $k \cdot P > l_k \cdot R_k$ має вигляд

$$R_i + l_i \cdot R_i - k \cdot P > P.$$

Перетворення цієї нерівності приводить до виразу $q > q^2/2$, що також є неможливим.

Отже, з останнього аналізу витікає, що забезпечити, щоб число з будь-якими викривленнями, що можуть виникнути в лишках за одною з довільних основ $p_i$ величиною $l_i \cdot R_i$, завжди відрізнялося від значення, яке має ліва межа цього інтервалу, неможливо.

Отже:

- викривлення за будь-якою з основ $p_i$ завжди переводить викривлене число в один з контрольних піддіапазонів з деяким номером, наприклад, з номером k;

- різниця між викривленим $l_i \cdot R_i$ й обома межами інтервалу $[k \cdot P,(k+1) \cdot P)$ є меншою за величину цього інтервалу $P$, а отже є меншою ніж максимальне значення невикривленого числа $A$.

Останнє свідчить про те, що в разі попадання викривлення величиною $l_i \cdot R_i$ в діапазон $[k \cdot P,(k+1) \cdot P)$ викривлене число $A^{/} = A_1 + l_i \cdot R_i$, величина якого $k \cdot P < A^{/} < (k+1) \cdot P$, може залишитися в цьому ж діапазоні, чи викривлене число $A^{//} = A_2 + l_i \cdot R_i$ таке, що

$$A^{//} > (k+1) \cdot P,$$

може потрапити в інший діапазон $[(k+1) \cdot P,(k+2) \cdot P)$.

## Висновки

З урахуванням вищевикладеного зрозуміло, що, в разі дотримання вимог щодо величин викривлень за різними основами у вигляді (1) та щодо величини контрольної основи у вигляді (2), можливим є випадок, коли нулізація при наявності викривлень за різними основами дасть однакове значення номеру піддіапазону. Це, в свою чергу, показує при таких значеннях контрольної основи можливість неоднозначного тлумачення результатів нулізації і необхідність додаткових перевірок.

Для виключення подібних випадків неправильного визначення місця, а отже і величин викривлень, слід підсилити вимоги (1) та (2) щодо величини контрольної основи та записати їх у вигляді

$$l_i \cdot R_i - l_j \cdot R_j > 2 \cdot P, \tag{5}$$

$$q > 2 \cdot p_n \cdot p_{n-1}. \tag{6}$$

Таким чином, при дотриманні умов (5), (6) результат нулізації у вигляді номеру піддіапазону має однозначний функціональний зв'язок з величиною викривлення $l_i \cdot R_i$, що дає також можливість однозначного визначення місця і величини викривлення, тобто визначення величин $p_i$ та $l_i$, а отже, і величини власне викривлення $\Delta\alpha_i$.

## Список літератури


*1. Василенко В.С.* Использование ВУ-кодов для повышения верности информации в радиоканалах // Матеріали 28 НТС Асоціації зв'язку України. – К.: КВІРТУ ППО, 1991. – С.23.

*2. Акушский И.Я., Юдицкий Д.И.* Машинная арифметика в остаточных классах // М.: Сов. радио, 1966. – 421 с.

*3. Василенко В.С., Матов О.Я.* Узагальнені завадостійкі коди в задачах забезпечення цілісності інформаційних об'єктів. Код умовних лишків // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2006. – Т. 6, № 4. – С.82.

УДК 004.056.5:12(045)

*К.П. Ануфрієнко, кандидат технічних наук НАУ, доцент,*
*А.І. Гізун, студент,*
*М.Ю. Коцурський, студент*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ОСНОВНІ КОМПЛЕКСИ КОДУ НА МОВІ C/C++, РЕЛЕВАНТНІ УРАЗЛИВОСТІ ПЕРЕПОВНЕННЯ БУФЕРУ

*Визначені деякі основні об'єкти мови програмування C/C++, ефект виконання яких у коді програми за певних умов може призвести до переповнення буферу. Результати даної роботи можуть бути використані для побудови засобів захисту від переповнення буферу програм на мові C/C++.*

*Постановка проблеми.* Дуже значна частка вірусів і хакерських атак мають в своїй основі уразливості переповнення буферу. Переповнення буферу, мабуть, одна з найцікавіших уразливостей програмного забезпечення, що дозволяє хакеру отримати практично повний доступ до комп'ютера користувача. Дана уразливість полягає у тому, що в програмі відбувається копіювання даних в певну ділянку пам'яті без перевірки того, чи достатньо для них вільного місця в цій ділянці пам'яті. Така зарезервована цільова область пам'яті і є буфером. Таким чином, коли даних забагато, частина їх виходить за границю буфера — відбувається його переповнення. Вміла маніпуляція над тим, куди потраплять ці надлишкові дані дозволяє зловмиснику отримати доступ практично до будь-якої області пам'яті. Це в свою чергу забезпечує реалізацію наступних цілей такої атаки:

- зчитування секретних змінних (паролі, дескриптори секретних файлів, ідентифікатори TCP/IP-з'єднань тощо);
- модифікація секретних змінних;
- передача управління на секретну функцію програми (створення нового облікового запису, відкриття сесії віддаленого управління, запуск файлів тощо);
- передача управління на shell-код.

*Аналіз досліджень і публікацій.* Аналіз багатьох джерел із дослідженню даної проблеми, в т.ч. [1-3], показує, що незважаючи на досить широкий і глибокий розгляд цього явища, деякі «білі плями» все ще залишаються. Так, з однієї сторони, досить багато праць присвячено механізму переповнення буферу на рівні мікропроцесорної логіки і адресації пам'яті [1]; з іншої сторони, значна увага також приділена розробці технологій, що забезпечують можливості захисту від переповнення (наприклад, технології NX, DEP) [2]. В той же час існує широке поле для досліджень співвідношень між принципами програмування на конкретній мові програмування і можливостями виникнення помилки переповнення буферу, тобто розгляд даної уразливості відносно високорівневої мови програмування.

*Постановка завдання.* Метою даної роботи є виділити зв'язок між функціями мови програмування C/C++ і уразливістю переповнення буфера, тобто спробувати систематизувати і узагальнити найбільш уразливі об'єкти мови програмування C/C++ щодо даної уразливості. У роботі [4] введене поняття комплексу уразливого коду як сукупності пов'язаних об'єктів певної мови програмування у тексті програми, ефект виконання яких за певних умов не відповідає загальній логіці програми. Тому мету цієї роботи можна сформулювати як визначення основних комплексів коду на мові C/C++, релевантних уразливості переповнення буферу.

*Виклад основного матеріалу досліджень.* Небезпеку з точки зору виходу за межі буферу становлять функції мови програмування C, які не порівнюють кількість даних, що переносяться. По суті такі функції припускають наявність необмеженого цільового буферу, який гарантовано буде достатнім для розміщення будь-якого об'єму даних. Розглянемо на прикладі деякі найбільш поширені, а тому й найбільш небезпечні їх види.

Найсуттєвішу групу зазначених вище функцій в мові програмування С становлять функції, що обробляють рядки (string). В даному випадку під рядком розуміють масив символів, що закінчується кінцевим нульовим символом рядка [5]. В практичному розумінні такі функції мови програмування С працюють з рядковим буфером (масив символів, для якого задані адреса початку і довжина). Функція має право обробляти такий буфер, заздалегідь отримавши і ініціалізувавши його як буфер (оголосивши як змінну перед самою функцією), і знаючи межі в пам'яті, в яких вона має право працювати [5]. З точки зору можливості переповнення буферу небезпеку становлять наступні операції з рядками:

- присвоєння рядку значення іншого рядка (копіювання рядків);
- дописування наприкінці рядка іншого рядка (конкатенація рядків).

За копіювання рядків в мові програмування С відповідають наступні функції [5]: strcpy(); strncpy(); strlcpy(); strcpy_s().

Небезпеку можливості переповнення становить перша з наведених функцій strcpy(). Вона має наступну структуру:

```
strcpy(target, source).
```

Тобто рядок source копіюється в рядок target [5]. Як бачимо, в якості аргументів функції вказуються лише два масиви: перший — цільовий, а другий — масив вихідних даних. Якщо вихідний масив виявиться більшим цільового масиву, то функція strcpy() запише дані за визначені межі — тобто відбудеться переповнення буферу:

```
char buffer[SIZE];
strcpy(buffer, line).
```

Конкатенація рядків в мові програмування С відбувається за рахунок використання наступних функцій [5]:

- strcat();
- strncat();
- strcat_s();
- strlcat().

Наприклад, функція strcat(target, source) приєднує рядок source наприкінці рядка target [5]. Аналогічно можна зробити висновок про беззаперечну можливість переповнення буферу і в цьому випадку:

```
char buffer[SIZE];
strcat(buffer, line).
```

Іншу групу ризикових щодо переповнення функцій мови програмування С становлять деякі функції введення (оскільки вони є формою безпосереднього впливу користувача на програмне середовище), зокрема інтерес представляють [5]:

- об'єкт cin класу istream, що відповідає за потокове введення з клавіатури;
- функція gets();
- в деякій меншій мірі і функція форматного вводу scanf().

В С++ буферизований потік cin замінює класичні функції вводу з клавіатури, що використовуються в мові програмування С. Наприклад, наступний фрагмент коду заповнює буфер:

```
char buffer[50];
cin>>buffer.
```

Як бачимо, синтаксис гранично простий і ніяких перевірок на межі буфера не спостерігається, що є беззаперечним доведенням можливості переповнення (слід зазначити про можливість уникнення цієї уразливості — при використанні метода ios::width() можна задати максимальне число символів для зчитування [5]). Аналогічна ситуація переповнення буферу може відбуватися і для функцій gets (char *array) та scanf (“%s”, string). Проте слід зазначити наступне: функція scanf() пропонує механізм контролю для розміру вхідних даних [5]:

```
char buffer[26];
scanf("%25s", buffer).
```

Таке форматування обмежує кількість символів, що копіюються в buffer до 25. Хоча, з іншої сторони, дана функція поміщає непотрібні їй символи назад в вхідний потік, тим самим збільшуючи ймовірність програмних помилок.

Мета зловмисника при реалізації переповнення — затирання наступних після буферу комірок пам’яті. В загальному випадку цей процес може відбуватися відносно об’єктів наступних типів:

- покажчики;
- скалярні змінні;
- інші буфери.

Покажчик — це змінна, в якій записана адреса комірки пам’яті комп’ютера. Можливість безпосереднього доступу до пам’яті за допомогою покажчиків — один з найбільш потужних засобів програмування на C [5]. Виходячи з цілей переповнення, можна виділити покажчики кількох типів:

- покажчики на функції (виконуваний код);
- покажчики на об’єкти (таблицю віртуальних функцій);
- покажчики на скалярну змінну.

Для початку розглянемо ситуацію, коли слідом за буфером, що переповнюється розміщується покажчик на функцію, яка ініціалізується до переповнення буферу і викликається після переповнення буферу. В цьому випадку зловмисник може отримати потужний інструмент для передачі управління практично на будь-яку машинну адресу, в тому числі і на сам переповнений буфер (тобто управління отримає код, переданий самим зловмисником) [3], наприклад:

```
char buff[8]; void (*some_func) ();
...
printf("passws:"); gets(buff);
...
some_func().
```

Інша можлива мішень для зловмисника — покажчик на об’єкт. В програмах на мові C++ зазвичай присутня велика кількість об’єктів, багато з яких створюються шляхом виклику оператора new, що повертає покажчик на тільки що створений екземпляр об’єкта [3]. Модифікувати покажчик на об’єкт або на таблицю віртуальних функцій достатньо легко, оскільки вони не тільки знаходяться в пам’яті доступній для модифікації, а й часто розміщені в безпосередній близькості до буферів, що переповнюються [3].

Розглянемо тепер ситуацію, коли слідом за переповненим буфером йде покажчик на скалярну змінну p і сама змінна x, яка в деякий момент виконання програми записується за даним покажчиком. Тоді, за можливості затирання переповненим буфером оригінальних значень x і p, зловмисник зможе записати будь-яке значення x за будь-якою адресою p за допомогою ураженої програми, чого, за певних умов, може бути достатньо для захоплення управління над всією системою [3], наприклад:

```
char buff[8]; int x; int *p;
printf("passws:"); gets(buff);
...
*p = x.
```

Скалярні змінні на відміну від покажчиків набагато менш цікаві для зловмисників тому, що їх можливості в більшості випадків суттєво обмежені. Модифікація скалярних змінних лише винятково в рідкісних випадках може призвести до захоплення управління, хоча, в іншому випадку, дозволяє вивести з ладу програму, зробивши з деяких важливих даних повну мішанину. Так, багато програм містять спеціальні змінні для налагодження, залишені розробниками, що дозволяють, наприклад, відключити систему аутентифікації [3]. Інший приклад: існує багато змінних, що містять початкові або гранично допустимі значення інших змінних (наприклад, лічильників циклу) [1]. Затирання скалярних змінних звичайно не призведе до миттєвого обвалу програми, що дозволить таким помилкам довгий час залишатися невиявленими.

Нарешті, буфери, що розміщуються безпосередньо слідом за переповненим буфером можуть містити деяку конфіденційну інформацію (наприклад, паролі). Розкриття чужих паролів, так само як і нав'язування програмі свого — цілком типова мета зловмисника. Крім того цікавими для атакуючого будуть буфери, що містять імена файлів, що відкриваються. Їх модифікація дозволяє змусити програму записати конфіденційні дані в загальнодоступний файл або, навпаки нав'язати загальнодоступний файл замість конфіденційного [3]. І, взагалі, небезпеку посилює той факт, що розміщені підряд буфери зовсім не рідкість для програм на мові С [1].

## Висновки

В даній роботі дана спроба визначення основних комплексів уразливого коду початкових текстів програм на мові С/С++ щодо можливості реалізації переповнення буферу. Були визначені деякі основні об'єкти мови програмування С/С++, ефект виконання яких у коді програм за певних умов призводить до переповнення буферу. Показані можливі об'єкти нападу зловмисника, модифікація яких призводить до небезпечних змін у роботі програми (захоплення управління, модифікація конфіденційних даних, відмова у обслуговуванні).

Результати даної роботи можуть бути використані для побудови засобів аналізу захищеності від переповнення буферу початкового тексту програм на мові С/С++ та засобів знешкодження уразливих до переповнення буферу комплексів кодів.

## Список літератури


*1. Хогланд Г.* Взлом программного обеспечения: анализ и использование кода / Г. Хогланд, Г. Мак-Гроу. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2005. – 400 с.

*2. Стюарт Мак-Клар.* Хакинг в Web: атаки и защита / Стюарт Мак-Клар, Саумил Шах, Ширай Шах. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 384 с.

*3. Касперски К.* Ошибки переполнения буфера извне и изнутри как обобщенный опыт реальных атак [Электронный ресурс] / К. Касперски // Ситстемный администратор. – № 4. – 2004. – Режим доступа: http://www.samag.ru/art/03.2004/03.2004_07.pdf. – Название с экрана.

*4. Ануфрієнко К.* Комплекси коду релевантні уразливостям / К.П. Ануфрієнко // Защита информации: Сб. науч. тр. НАУ, 2008. – Спец. вып. – С.173-176.

*5. Либерти Дж.* Освой самостоятельно С++ за 21 день / Джесс Либерти, Брэдли Джонс. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2009. – 784 с.

УДК 004.056.55(045)

*С.О. Гнатюк, аспірант,*
*В.М. Кінзерявий, аспірант,*
*Є.В. Паціра, кандидат технічних наук, доцент,*
*О.Г. Корченко, доктор технічних наук, професор*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# КВАНТОВА СИСТЕМА РОЗПОДІЛУ КРИПТОГРАФІЧНИХ КЛЮЧІВ

*Запропонована система розподілу криптографічних ключів відноситься до галузі криптографічного захисту інформації і може бути використана для безпечного розподілу криптографічних ключів між легітимними користувачами з метою їх подальшого використання у класичних схемах шифрування. Досягнення даного технічного ефекту ґрунтується на непорушності законів квантової механіки.*

Однією з найважливіших проблем інформаційного суспільства являється захист інформації від несанкціонованого доступу. Серед інших виділяють криптографічний метод захисту інформації, що полягає в шифруванні (дешифруванні) повідомлення за допомогою додаткової секретної інформації (ключа) відповідно до деякого алгоритму. Алгоритми шифрування і розшифрування є відомими та відкритими, а секретність криптограми повністю залежить від секретності ключа. Проблема розподілу ключів має два варіанти вирішення – математичний, який використовується у традиційній криптографії з відкритим ключем та фізичний, що використовується у квантовій криптографії [1], [2]. Не зважаючи на це, на даний момент, не існує жодного практичного криптографічного механізму, який гарантував би абсолютну захищеність ключа шифрування під час його передачі звичайним (не квантовим) комунікаційним каналом [3].

Існуючі на даний час розробки, що покликані забезпечити належний рівень секретності процесу розподілу ключів шифрування, можна диференціювати наступним чином – це системи, основані на асиметричних алгоритмах шифрування та корпоративні продукти, що базуються на квантовому розподілі ключів. Якщо перші є загальнодоступними відкритими рішеннями, в основі яких лежать складні математичні алгоритми, то останні являються результатом багаторічних досліджень європейських та американських учених і, здебільшого, мають закриту інфраструктуру. Серед компаній, які досягли найзначніших успіхів у розробці систем, що використовують квантовий розподіл ключів, варто відмітити MagiQ Technologies, id Quantique, GAP-Optique, IBM, Fujitsu, Quantum Communications Victoria, Toshiba Research Europe та інші. До недоліків існуючих систем квантового розподілу ключів можна віднести обмежену довжину квантового каналу, надмірну чутливість до умов навколишнього середовища, проблему детектування одиничних фотонів на фоні сильного шуму та поступового затухання сигналів.

Метою створення даної системи є виключення можливості перехоплення криптографічного ключа в процесі міжабонентної передачі. Для досягнення даної мети була поставлена задача розробки квантової системи розподілу криптографічних ключів, що дозволить виключити ймовірність перехоплення ключа під час його передачі від першого абонента до другого. Поставлена задача вирішується за допомогою квантового розподілу ключів, який що ґрунтується на використанні фізичного каналу (оптоволоконного) і передачі по ньому поляризаційних станів фотонів від одного абонента до іншого. Технічний результат, який може бути отриманий при створенні системи полягає у виключенні можливості перехоплення криптографічних ключів у процесі міжабонентної передачі.

Сутність запропонованої квантової системи розподілу криптографічних ключів (рис. 1) полягає у тому, що задача безпечної передачі ключів вирішується за допомогою квантового розподілу ключів, який оснований на непорушності законів квантової механіки. Основними принципами квантової механіки [4], що лежать в основі системи, являються:

- принцип невизначеності Гейзенберга, згідно якого неможливо провести вимірювання в квантовій системі, не змінивши її – це дозволяє детектувати будь-які втручання в систему з боку третіх осіб. Іншими словами, стан квантового об’єкта може бути визначено за допомогою вимірювання, але відразу після виконання вимірювання об’єкт неодмінно переходить в інший стан, передбачити який неможливо;

- неможливість одночасного вимірювання взаємодоповнюючих параметрів системи – тобто зловмисник не може одночасно виміряти хвильові та корпускулярні властивості системи – це значно зменшує ймовірність перехоплення повідомлення зловмисником під час між абонентної передачі;

- неможливо з абсолютною точністю одночасно виміряти поляризацію фотона в ортогональному та діагональному базисах – збільшує кількість помилок при спробі втручання і вимірювання на 50 % (якщо використовувати один із протоколів, що передбачає використання двох базисів) [5];

- «теорема про неможливість клонування квантових станів» [6], яка вказує на неможливість копіювання довільного квантового стану з боку зловмисника – це унеможливлює створення точних копій станів фотонів за умов використання будь-якого обладнання.

У сукупності вищеперераховані ознаки роблять можливим досягнення даного технічного результату. Таким чином, стійкість квантової системи розподілу криптографічних ключів не залежить від обчислювальних можливостей зловмисника.

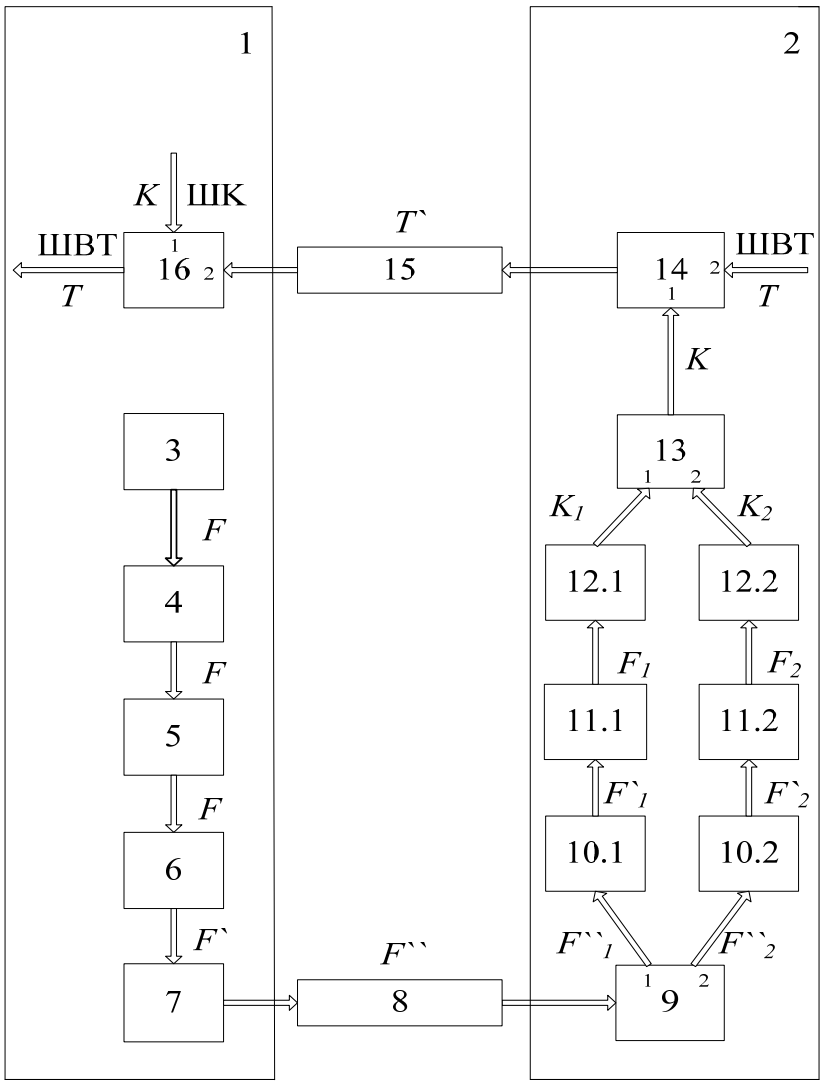



Рис. 1. Структурна схема квантової системи розподілу криптографічних ключів

Представлена на рис. 1 квантова система розподілу криптографічних ключів [6] містить: модуль *1* абонента відправника; модуль *2* абонента приймача; лазерне джерело випромінювання *3*; оптичний циркулятор *4*; інтерферометр Маха-Цендера *5*; два волоконно-оптичні фазові модулятори *6* та *9*; керуючий оптичний одномодовий атенюатор *7*; захищений волоконно-оптичний канал *8*; два фотодетектори *10.1* та *10.2*; два напівпровідникові оптичні підсилювачі *11.1* та *11.2*; два аналогово-цифрових перетворювачі *12.1* та *12.2*; блок *13* конкатенації ключових повідомлень; блок *14* шифрування даних; відкритий канал *15*; блок *16* дешифрування даних; шину відкритого тексту (*ШВТ*) і шину ключа (*ШК*).

У загальному вигляді квантова система розподілу криптографічних ключів працює наступним чином [6]: абонент *1* відправник генерує послідовність коротких оптичних імпульсів *F* (на довжині хвилі 1550 нм) за допомогою лазерного джерела випромінювання *3*, яка надходить на вхід оптичного циркулятора *4*, після цього задана послідовність надходить на вхід інтерферометра Маха-Цендера *5* для направленої передачі, вихід якого сполучений з входом волоконно-оптичного фазового модулятора *6*, який здійснює фазове кодування фотонів, результатом чого на його виході з'являється послідовність *F`*, яка надходить на вхід керуючого оптичного одномодового атенюатора *7*, що послаблює дану послідовність до рівня одиничних фотонів і з виходу даного блоку передається у вигляді ослабленої послідовності одиничних фотонів *F``* через захищений волоконно-оптичний канал *8* до абонента *2* приймача на вхід другого волоконно-оптичного фазового модулятора *9*, який здійснює фазове декодування послідовності *F``*, таким чином, що на його першому і другому виходах з'являються послідовності $F``_1$ та $F``_2$ відповідно, які передаються на перший *10.1* і другий *10.2* фотодетектори відповідно (причому абонент *1* відправник та абонент *2* приймач попередньо домовились про порядок розташування детекторів), перший з яких *10.1* аналізує фотони в ортогональному, а другий *10.2* в діагональному базисах і передають послідовності $F`_1$ та $F`_2$ на вхід першого *11.1* і другого *11.2* напівпровідникового оптичного підсилювача відповідно, де сигнали підсилюються, щоб зменшити наслідки впливу завад, після чого з виходів *11.1* та *11.2* послідовності $F_1$ та $F_2$ відповідно надходять на вхід першого і другого аналогово-цифрового перетворювача *12.1* та *12.2*, на виході яких з'являються цифрові двійкові послідовності $K_1$ та $K_2$, які передаються відповідно на перший та другий вхід блоку *13* конкатенації ключових повідомлень, на виході якого формується єдина двійкова ключова послідовність *K*, що надходить на перший вхід блоку шифрування даних *14*, на другий вхід якого через шину *ШВТ* надходить вхідне повідомлення *T* і в результаті здійснення шифрування за загальновідомим симетричним алгоритмом [7] на виході блоку *14* з'являється зашифрована послідовність *T`*, яка передається відкритим каналом *15* на другий вхід блоку дешифрування *16*, на перший вхід якого через шину ключа *ШК* подається двійкова ключова послідовність *K* і, в результаті здійснення дешифрування вищезгаданим загальновідомим симетричним алгоритмом [8], на виході блоку *16* отримуємо дешифроване повідомлення *T*, яке передається на шину *ШВТ*.

**Висновки**

Запропонована квантова система розподілу криптографічних ключів має перспективу практичної реалізації на апаратних засобах і здатна забезпечити захищеність ключа у процесі міжабонентної передачі у безпровідних або волоконно-оптичних мережах. Проте, не зважаючи на теоретичну можливість отримання вищезгаданого технічного ефекту, під час практичної реалізації у даній квантовій системі розподілу криптографічних ключів можуть виявитись проблеми, не виявлені під час теоретичних досліджень. До таких проблем можна віднести – проблему обмеження довжини квантового каналу через неможливість його підсилення без втрат квантових властивостей, проблему аналізу одиничних фотонів під впливом шуму та інші. Подібні проблеми можуть стати об'єктом майбутніх досліджень та удосконалень в даній галузі.

## Список літератури


*1. Качаев И.А.* Квантовые вычисления. – Протвино, 2001. – 24 с. – (Препр. / Государственный научный центр РФ. Институт физики высоких энергий; 2001 – 12).

*2. Нильсен М., Чанг И.* Квантовые вычисления и квантовая информация. – М.: Мир, 2006. – 824с.

*3. Кулик С.П., Шапиро Е.А.* Физика квантовой информации: Квантовая криптография. Квантовая телепортация. Квантовые вычисления / Пер. с англ. *С.П. Кулика, Т.А. Шмаонова.* – М.: Постмаркет, 2002. – С.33-73.

*4. Bruss D., Luetkenhaus N.* Quantum Key Distribution: From Principles to Practicalities. – arXiv: quant-ph / 9901061, Vol. 2 (1999).

*5. Gisin N.* Quantum cryptography / *Gisin N., Ribordy G., Tittel W., Zbinden H.* // Reviews of Modern Physics. – 2002. – Vol. 74, № 1. – P.145-195.

*6. Wooters W.K., Zurek W.H.* A single quantum cannot be cloned // Nature. – 1982. – Vol. 299. – P.802.

*7. Гнатюк С.О.* Система передачі криптографічних ключів // Матеріали III Міжнар. наук. конф. молодих науковців "Комп'ютерні науки та інженерія – 2009" (CSE-2009). – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2009. – С.306-307.

*8. NIST.* “FIPS-197: Advanced Encryption Standard.” Nov. 2001. Available at http://csrc.nist.gov/publications/fips/.

УДК 004.056.55:12(045)

*В.М. Кінзерявий, аспірант,*
*С.О. Гнатюк, аспірант,*
*О.Г. Корченко, доктор технічних наук, професор,*
*Є.В. Паціра, кандидат технічних наук, доцент*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# КРИПТОГРАФІЧНИЙ СПОСІБ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПОБУДОВАНИЙ НА ШИФРІ ФАЙСТЕЛЯ

*Запропонований спосіб шифрування інформації відноситься до галузі криптографічного захисту інформації і може бути використаний в засобах шифрування у системах обробки інформації для розширення їх можливостей. Технічний результат досягається за допомогою використання великого секретного ключа, використанні у функції f операцій динамічних підстановок і операцій динамічного циклічного зсуву, що залежних від значень розширених ключів.*

Останні десятиліття спостерігається небувалий бум в області криптографії. З кожним роком різко збільшується число відкритих робіт з питань криптології, а криптоаналіз стає однією з областей досліджень, що найактивніше розвиваються. При цьому розробляються нові і удосконалюються уже відомі методи криптоаналізу алгоритмів шифрування. Велика кількість алгоритмів, стійкість яких не викликала особливих сумнівів, виявилися успішно розкритими. Завдяки сучасній комп'ютерній техніці стали можливими деякі методи нападів на алгоритми шифрування, які рахувалися не практичними і лише теоретичними [1]. Тому одвічною проблемою є створення надійного криптографічного способу перетворення інформації, який міг би забезпечити достатню криптостійкість. Вирішенням цієї проблеми займаються багато спеціалістів по всьому світу і вона завжди залишається актуальною.

В основі запропонованого способу лежить шифр Файстеля. Ідея шифру Файстеля дуже проста: кожен раунд являє собою побітове додавання значення $L$ із значенням $F(Ki, R)$ (де $F$ – це є деяка функція) і наступний обмін місцями значень $L$ й $R$ [2]. У якості функції $F$ запропоновано нову послідовність операцій з використанням динамічно змінюваних блоків підстановок, операцій динамічного циклічного зсуву, операцій додавання по модулю 2, які залежать від значень розширених ключів. Крім того в способі використовується секретний ключ великого розміру і спосіб розширення ключа, в якому біти кожного розширеного ключа були б рівно імовірними та статично незалежними один від одного. Аналізуючи відомі способи шифрування інформації, які побудовані на шифрі Файстеля, можна виділити такі їх недоліки: в них використовується не достатньо великий секретний ключ, статичні блоки підстановок та статичні операції циклічного зсуву. При сучасному розвитку криптоаналізу і комп'ютерної техніки вони вже не можуть забезпечувати достатню криптостійкість, тому є потреба розроблення нових, більш сучасних способів шифрування інформації.

Основною задачею є створення способу криптографічного перетворення інформації, який дасть змогу гнучко змінювати параметри криптографічної обробки, динамічно керувати процесом розсіювання інформаційних даних і який повинен забезпечити достатню криптостійкість на багато років вперед.

Сутність запропонованого способу криптографічного перетворення інформації полягає в тому що, інформаційну послідовність подають у вигляді блоків даних, які підлягають шифруванню шляхом розбиття блока даних на два підблоки $L$ і $R$, які підлягають ітеративній обробці через виконання операції порозрядного додавання за модулем два над підблоком $L$ і допоміжним бінарним вектором, який утворюють в результаті обробки значення підблоку $R$ блоками перестановок ($P$-блоками), динамічно змінюваними блоками підстановок ($S$-блоками) і операціями динамічного циклічного зсуву, після чого підблоки $L$ і $R$

переставляють місцями. При шифруванні виконують $r$ ($r \geq 16$) ітерацій (причому сторони попередньо домовляються про кількість ітерацій). Використовують $n$-бітний ($n \geq 256$) секретний ключ, при розширенні якого отримують $2r+2$ ($r \geq 16$) $m$-бітних ($m \geq 64$) розширених ключів, які використовують при шифруванні. На початку і в кінці шифрування даних використовують по одному розширеному ключу, із значеннями яких виконують відповідно операції порозрядного додавання за модулем два вхідних і вихідних даних. У кожній ітерації використовують по два розширених ключі які впливають на формування допоміжного бінарного вектору, відповідно до значень яких змінюють $S$-блоки і кількість біт для циклічного зсуву, також при формуванні допоміжного бінарного вектору використовують операції порозрядного додавання за модулем два значень розширених ключів із оброблюваними даними. Дешифрування проводять аналогічним чином, тільки розширені ключі подають в оберненому напрямку.

Цей приклад є варіантом способу шифрування даних. В ньому виконують 16 ітерацій шифрування і використовують 256-бітний секретний ключ при розширенні якого створюють 34 64-бітні розширенні ключі. Для його здійснення необхідно виконати наступну послідовність операцій:

1. Необхідно провести процедуру розширення 256-бітного секретного ключа для отримання тридцяти чотирьох 64-бітних розширених ключів $K_j$ ($j = \overline{0,33}$). Для формування розширених ключів використовують наступну модифікацію способу розширення ключа описаного в [3].

Спочатку 256-бітний секретний ключ представляють у вигляді восьми 32-бітних векторів, позначених як $w_{-8}...w_{-1}$. Ці 32-бітні вектори використовують як вихідні значення для обчислення інших 32-бітних векторів, а саме послідовності $w_0...w_{67}$ за формулою:

$$w_i = (w_{i-8} \oplus w_{i-5} \oplus w_{i-3} \oplus w_{i-1} \oplus \phi \oplus i) <<< 11,$$

де $\phi$ = 9E3779B9 у шістнадцятеричному запасі; <<< – це операція лівого циклічного зсуву; $\oplus$ – це операція порозрядного додавання за модулем два.

Таким чином формують множину із 68-ми 32-бітних векторів, після чого обчислюють 64-бітні розширені ключі з використанням таблиць замін $S_0...S_7$ ($S$-блоки взяті з [3] і наведені в табл. 1):

$K_0 = S_3(\{w_0, w_1\})$,
$K_1 = S_2(\{w_2, w_3\})$,
$K_2 = S_1(\{w_4, w_5\})$,
$K_3 = S_0(\{w_6, w_7\})$,
...
$K_{32} = S_3(\{w_{64}, w_{65}\})$,
$K_{33} = S_2(\{w_{66}, w_{67}\})$.

Таблиця 1

Блоки підстановок ($S$-блоки)

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **$S_0$** | 3 | 8 | 15 | 1 | 10 | 6 | 5 | 11 | 14 | 13 | 4 | 2 | 7 | 0 | 9 | 12 |
| **$S_1$** | 15 | 12 | 2 | 7 | 9 | 0 | 5 | 10 | 1 | 11 | 14 | 8 | 6 | 13 | 3 | 4 |
| **$S_2$** | 8 | 6 | 7 | 9 | 3 | 12 | 10 | 15 | 13 | 1 | 14 | 4 | 0 | 11 | 5 | 2 |
| **$S_3$** | 0 | 15 | 11 | 8 | 12 | 9 | 6 | 3 | 13 | 1 | 2 | 4 | 10 | 7 | 5 | 14 |
| **$S_4$** | 1 | 15 | 8 | 3 | 12 | 0 | 11 | 6 | 2 | 5 | 4 | 10 | 9 | 14 | 7 | 13 |
| **$S_5$** | 15 | 5 | 2 | 11 | 4 | 10 | 9 | 12 | 0 | 3 | 14 | 8 | 13 | 6 | 7 | 1 |
| **$S_6$** | 7 | 2 | 12 | 5 | 8 | 4 | 6 | 11 | 14 | 9 | 1 | 15 | 13 | 3 | 10 | 0 |
| **$S_7$** | 1 | 13 | 15 | 0 | 14 | 8 | 2 | 11 | 7 | 4 | 12 | 10 | 9 | 3 | 5 | 6 |

Спочатку 32-бітні вектори $w_i$, $w_{i+1}$ конкатенують в 64-бітний вектор, після чого пропускають через *S*-блоки, що є блоками замін 4 на 4 біт. Для цього 64-бітний вектор розбивають на 16 векторів по 4 біта, після чого виконують табличну заміну 4 на 4 біт, а отриманий результат конкатенують у 64-бітний вектор.

2. Для шифрування вхідних даних виконують операцію порозрядного додавання за модулем два 64-бітних вхідних даних із 64-бітним розширеним ключем $K_0$, після чого результат ділять на дві частини: старші 32 біта ($\overline{64,33}$) стануть *L*-блоком, а молодші 32 біта ($\overline{32,1}$) – *R*-блоком.

3. Дані шістнадцять разів підлягають ітеративній обробці, причому *i*-та ($i = \overline{1,16}$) ітерація описується наступною послідовністю операцій:

3.1. Значення 32-бітного блоку *R* проходить через блок розширення (таблиця розширення наведена в табл. 2).

Таблиця 2

Таблиця розширення

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 32 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 |
| 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 1 |

3.2. 64-бітний розширений ключ $K_{2i-1}$ ділять на два вектори в одному будуть старші 48 біт ($\overline{64,17}$), в іншому будуть молодші 16 біт ($\overline{16,1}$).

3.3. 64-бітний розширений ключ $K_{2i}$ ділять на два вектори в одному будуть старші 48 біт ($\overline{64,17}$), в іншому будуть молодші 16 біт ($\overline{16,1}$).

3.4. 48-бітний вектор утворений в пункті 3.2 порозрядно складають за модулем 2 з утвореним в пункті 3.1 48-бітним вектором.

3.5. Вибирають пару *S*-блоків, яку будуть використовувати для підстановки (*S*-блоки наведені в табл. 1). Для цього 16-бітний вектор сформований в пункті 3.2, ділять на дві частини по 8 біт. Кожну з цих частин використовують для вибору номеру одного *S*-блоку, яким будуть здійснювати подальшу обробку. Вибір *S*-блоку здійснюють у такий спосіб: складають старші 4 біта ($\overline{8,5}$) і молодші 4 біта ($\overline{4,1}$) за модулем 8, в результаті отримують число від 0 до 7, яке і буде номером *S*-блоку.

За допомогою 48-бітного вектору утвореного в пункті 3.3 в вибраних парах *S*-блоків міняють порядок колонок, у такий спосіб: якщо перший біт 48-бітного вектора дорівнює 1 тоді міняють місцями 1-у і 2-у колонки вибраних *S*-блоків, якщо другий біт дорівнює 1 тоді міняють 2-у і 3-ю колонки вибраних *S*-блоків, якщо 3 біт дорівнює 1 міняють 3-ю і 4-у колонки. І так продовжують 48 разів поки не будуть враховані всі біти 48-бітного вектора (в варіанті коли дійшли до останньої колонки міняють місцями 16-у і 1-у колонки).

3.6. Результат отриманий в пункті 3.4 пропускають через пару отриманих в пункті 3.5 *S*-блоків, для цього 48-бітний результат пункту 3.4 розбивають на вектори по 4 біти і проводять заміну 4 на 4 біта, у такий спосіб: непарні вектори проходять через перший обраний *S*-блок, а парні – через другий обраний *S*-блок.

3.7. Виконують операцію порозрядного додавання за модулем два 48-бітного результату пункту 3.6 і 48-бітного вектору отриманого в пункті 3.3.

3.8. Над 48-бітним результатом пункту 3.7 здійснюють перестановку (таблиця перестановки розрядів наведена в табл. 3).

Таблиця 3

Таблиця перестановки розрядів

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 16 | 7 | 20 | 21 | 29 | 12 |
| 28 | 17 | 1 | 15 | 23 | 26 |
| 5 | 18 | 31 | 10 | 2 | 8 |
| 24 | 14 | 32 | 27 | 3 | 9 |
| 19 | 13 | 30 | 6 | 22 | 11 |
| 4 | 25 | 48 | 46 | 44 | 42 |
| 40 | 38 | 36 | 34 | 47 | 45 |
| 43 | 41 | 39 | 37 | 35 | 33 |

3.9. На кількість одиниць в 16-бітному векторі отриманому в пункті 3.3, виконують нижчезазначену операцію циклічного зсуву. 48-бітний результат пункту 3.8 ділять на чотири 12-бітні вектори, перший і третій з яких піддають операції лівого циклічного зсуву, другий і четвертий – правого циклічного зсуву вправо.

3.10. З кожного з чотирьох 12-бітних векторів отриманих в результаті пункту 3.9 вибирають тільки молодших вісім біт і конкатенують в 32-бітний вектор даних (результат пункту 3.10 і є допоміжним вектором даних).

3.11. Блок $L$ порозрядно додають за модулем два із 32-бітним результатом пункту 3.10, після чого блоки $L$ і $R$ міняють місцями.

4. Після проходження 16 ітерацій 32-бітні блоки $L$ і $R$ конкатенують в 64-бітний вектор у такий спосіб: біти блоку $R$ використовують як старші біти, а біти блоку $L$ як молодші. В результаті отриманий 64-бітний вектор порозрядно додають по модулю два з 64-бітним розширеним ключем $K_{33}$, в результаті чого отримують зашифровані вихідні 64-бітні дані.

Завдяки тому, що використовують великий 256-бітний секретний ключ (стає технічно неможливою атака тотального перебору ключів) і в кожній ітерації використовують динамічно змінювані блоки підстановок ($S$-блоки), операції динамічного циклічного зсуву, які залежать від значень розширених ключів (дають змогу гнучко змінювати параметри криптографічної обробки, та значно ускладнюють можливий криптоаналіз), виконуються операції порозрядного додавання за модулем два оброблюваних даних із значеннями розширених ключів. Це все робить можливим вирішення поставленої задачі.

## Висновок

Використання даного способу криптографічного перетворення інформації дасть змогу гнучко змінювати параметри криптографічної обробки, динамічно керувати процесом розсіювання інформаційних даних і повинно забезпечити достатню захищеність від можливих атак. Запропонований спосіб може бути реалізований на апаратних і програмних засобах, а в майбутньому існує перспектива подальшого дослідження і розробки інших способів шифрування.

## Список літератури

*1. Ростовцев А.Г., Михайлова Н.В.* Методы криптоанализа классических шифров. – http://www.realcoding.net/article/view/1757.

*2. Алферов А.П., Зубов А.Ю., Кузьмин А.С., Черемушкин А.В.* Основы криптографии. – М.: Гелиос АРВ, 2002. – 480 с.

*3. Serpent,* the second finalist in the Advanced Encryption Standard (AES) contest. Available at http://www.cl.cam.ac.uk/~rja14/serpent.html.

УДК 005.311.2:004.94

*П.М. Павленко, д.т.н., заст. дир. з наук.-метод. роботи ІІДС*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ ВИРОБНИЧОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*Розглянуті проблемні питання розробки та впровадження інтегрованих автоматизованих CAD/CAM/CAE та PDM систем в сучасних кризових умовах збереження та розвитку промислових виробництв України.*

Процес становлення в Україні ринкової економіки, відкритість вітчизняного економічного простору для експорту сучасних технологій і продукції та вступ у всесвітню торгівельну організацію вимагає нагального забезпечення конкурентоспроможності наших підприємств. Одним із найбільш значущих та визначальних чинників забезпечення конкурентоспроможності продукції, робіт та послуг підприємств (в подальшому виробів) є впровадження спеціалізованих комп'ютерних систем, які реалізують інформаційну підтримку етапів життєвого циклу виробів. До спеціалізованих комп'ютерних систем виробничого призначення прийнято відносити сукупність інтегрованих автоматизованих систем, які автоматизують всі етапи життєвого циклу промислових виробів. Методологічним підґрунтям цих систем є методології CALS (Computer-Aided Acquisition and Lifecycle Support) технологій та PLM (Product Life-cycle Management) рішень.

Найбільш використовуваними в проектно-виробничій та експлуатаційній діяльності підприємств України є CAD/CAM/CAE-, ERP- та PDM- системи. Фахівці підприємств мають змогу ознайомитись (через Internet, навчання в ВНЗ та на своїх робочих місцях) з десятками цих різноманітних спеціалізованих комп'ютерних систем. Серед вказаного різноманіття інтегрованих автоматизованих систем беззаперечними лідерами є розробники корпорації Dassault Systemes (Франція), які є ідеологами концепції PLM – рішень для більшості галузей промислового виробництва CAD/CAM/CAE – система Catia v6 та універсальна PDM-система ENOVIA SmarTeam v6 давно стали базовими системами для фахівців аерокосмічної, автомобільної та інших галузей промисловості.

В 2008 році розробники Dassault Systemes розробили нові рішення PLM 2.0 (PLM он-лайн для всіх), які представляють собою он-лайнове середовище для доступу до віртуального виробу в 3-х мірному вигляді, яка дозволяє розробляти та приймати участь во всіх процесах реалізації етапів життєвого циклу виробів (проектуванні, виробництві, експлуатації та ін.) Разом з тим, відсутність належного методичного забезпечення по впровадженню і експлуатації, недостатній в більшості випадків функціонал цих систем, відсутність інтеграції більшості систем приводить до значних проблем з їх експлуатацією та впровадженням.

Автор на основі досвіду розробки та впровадження комп'ютерних систем виробничого призначення розкриває в доповіді основні проблеми, які гальмують процес масового використання цих систем, як це є в промислово розвинених країнах світу, та країнах, які стрімко розвивають своє промислове виробництво (Китай, Індія, Пакистан та ін.).

Розглянемо спочатку спільні для всіх промислових підприємств сучасні специфічні умови, які активують нагальну потребу впровадження інтегрованих автоматизованих систем. До таких умов віднесемо наступні:

1. Специфіка сучасної продукції заключається в зростанні її складності, модифікації конфігурації виробів та врахуванні не тільки технічних факторів, а і соціально-економічних.

2. Різке зростання різноманітних технічних систем та науково-технічної інформації, яка використовується в розробках, скорочення строків створення нових виробів та

зменшення часу їх морального старіння. Сукупність цих факторів привела до того, що об'єм необхідних при цьому робіт зростає приблизно в 10 разів через кожні 10 років. Звідси – значні проблеми з кадровим ресурсом, невідповідність між необхідним та фактичним об'ємами робіт.

3. Нові вироби повинні все в більшій мірі відповідати вимогам його користувача, а не вимогам і можливостям його розробників.

4. Можливості вдосконалення якості виробів змістились з галузі виробництва в галузь проектування і використання. Виробник виробу надалі займається не тільки його випуском, а сам створює умови його ефективної експлуатації у користувача. В цьому випадку виріб стає дійсно потрібним користувачу і стає конкурентоспроможним.

Досвід промислово розвинених країн однозначно доводить, що тільки сучасні інтегровані автоматизовані системи в змозі враховувати названі умови і забезпечити стратегічний розвиток підприємств.

На думку автора промисловим підприємствам України в умовах світової кризи потрібно не тільки зберегти своє виробництво, а й провести реорганізацію виробничих та управлінських процесів для забезпечення подальшого стратегічного розвитку. Промислово розвинені країни світу ці задачі вирішують за допомогою сучасних інтегрованих автоматизованих систем виробничого призначення, які успішно реалізують інтеграцію конкретного підприємства в світове промислове виробництво. В основі таких 3D-технологій − електронний опис промислового виробу, який використовується фахівцями на всіх етапах життєвого циклу цього виробу у відповідних інтегрованих автоматизованих системах, таких як CAD/CAM/CAE-, PDM-, ERP-системах та інших.

На жаль, проблеми адаптації та впровадження сучасних інтегрованих автоматизованих систем недооцінюються більшістю керівників сучасних підприємств. Для багатьох головним є не закрити підприємство. Це дуже хибні рішення й поведінка, які заводять підприємство в глухий кут невирішених проблем.

Ці проблеми можна розділити на внутрішні та зовнішні. Так, до основних внутрішніх відносять:

1. Невідповідність виробничих процесів та організаційно-штатної структури підприємств сучасним вимогам.
2. Комунікаційні та інформаційні бар'єри між учасниками життєвого циклу виробів (виробниками, постачальниками комплектуючих і матеріалів, субпідрядниками, експлуатаційниками, замовниками та іншими).
3. Інформаційний хаос в документації та прикладних комп'ютерних системах.

Основними зовнішніми проблемами є:

1. Відсутність законодавчої стабільності в Україні в юридично-правовій сфері виробничої діяльності.
2. Відсутність єдиного державного підходу, підтримки та координації процесів впровадження інтегрованих автоматизованих систем, на рівні відповідних міністерств та комітетів.
3. Недостатня конкурентоспроможність промислових виробів, що випускаються українськими підприємствами (дизайн, собівартість, час експлуатації та ін.).

Це далеко не повний перелік проблем. Але навіть з нього видно, що більшість із них пов'язані з недостатнім використанням можливостей інтегрованих автоматизованих систем та сучасних інформаційних технологій.

Наш досвід розробки та впровадження інформаційних технологій дозволяє ставити задачі, які надзвичайно актуальні для розвитку та життєдіяльності українських підприємств у даний час. До таких задач відносять:

1. Проведення додаткового навчання та підвищення кваліфікації провідних фахівців у галузі інформаційних технологій. В інший час це найбільш завантажена категорія працівників, яка не має часу на відрядження та навчання. Інвестиції в підвищення їх кваліфікації з часом принесуть суттєві результати.

2. Створення електронного архіву технічної документації. Такий архів дозволить не тільки навести інформаційний лад на підприємстві, а й значно скоротити витрати (фінансові, часові та ін.) на пошук інформації, розробку проектної документації, інтеграцію проектних, управлінських та інших робіт.

3. Розробка пілотного проекту по створенню інтегрованого інформаційного середовища для автоматизованих систем виробничого призначення. Основою проекту повинна стати універсальна PDM-система (система управління даними та технічним документообігом). Автори у своїй роботі використовують систему ENOVIA SmarTeam (розробник − компанія Dassault Systemes, Франція), яка з високою ефективністю впроваджена в різні галузі промислового виробництва українських та російських підприємств.

4. Проведення тестових проектних робіт фахівцями підприємства в інформаційних середовищах різних ІАС використовуючи безкоштовні можливості по дослідницькій експлуатації ІАС від дистриб'юторів та поставщиків цих систем. Таке тестування дозволяє провести промислову апробацію ІАС, виконати їх аналіз та вибір, а також отримати оптимальний електронний варіант проекту (цифрової моделі виробу, виробничого процесу, експлуатаційної документації та ін.)

5. Максимальне впровадження 3D-технологій у виробничу діяльність для автоматизації проектної, планової, управлінської та іншої діяльності. Впровадження має бути направлено на використання повноцінних PLM-рішень, що базуються на інтеграційних ISO-стандартах, мають перспективу розвитку та вітчизняний досвід використання.

Період кризи може стати часом наведення порядку у сфері автоматизації інформаційних потоків та проектних робіт. В інших (більш сприятливих) умовах на ці задачі підприємства, як правило, не мали часу. Час оптимізації та підвищення ефективності всіх виробничих процесів настав сьогодні. Вирішення вказаних задач забезпечить як виживання, так і розвиток українських підприємств в напрямі їх конкурентоспроможності та мобільності на світових ринках промислової продукції.

## Висновки

Таким чином, врахування та вирішення вищеназваних задач по впровадженню сучасних інтегрованих автоматизованих систем виробничого призначення допоможе керівництву ІТ-підрозділам підприємств та власникам підприємств не тільки зберегти виробництво, а й забезпечити його стратегічний розвиток в напрямку зростання конкурентоспроможності промислової товарної продукції та виконуваних послуг.

УДК 62.50

*В.И. Чепиженко, кандидат технических наук*
*(Государственный научно-исследовательский институт авиации, Украина)*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ CALS-ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*Предложено модельное представление ядра CALS-процессов на основе интеграции информационного и энергетического подходов*

В настоящее время в мировой практике при проектировании, производстве и эксплуатации сложных технических систем (далее – СТС) широко применяются CALS-процессы, в основе которых лежат технологии непрерывной информационной поддержки жизненного цикла СТС.

Под сложной технической системой в дальнейшем будем понимать такую физическую систему, в которой все функциональные процессы имеют динамический характер, и эти процессы могут быть описаны лишь с помощью специальных моделей с той или иной степенью адекватности. Характерными свойствами СТС являются иерархичность и сложные структурные и функциональные взаимоотношения между элементами системы.

Ядром CALS-процессов являются [1]:

- интегрированные информационные модели самих СТС, отражающие целевое назначение систем;
- информационные модели эволюции технического состояния СТС на всем интервале их жизненного цикла;
- модели производственной и эксплуатационной среды.

Такие модели являются разрозненными и в рамках единого CALS-процесса требуют функциональной и структурной интеграции.

Фундаментальной основой исследований CALS-процессов функционирования и эволюции состояния СТС сегодня являются теоретико-вероятностные методы. В теоретико-вероятностной схеме прогнозируется не поведение СТС, а частота того или иного ее поведения, связанная с вероятностью.

Проведенный анализ применения теоретико-вероятностных методов показывает, что они являются недостаточно эффективными при моделировании широкого класса CALS-процессов и явлений в СТС в тех случаях, когда:

– исследователь имеет в наличии ограниченное количество однотипных СТС или исследуемая СТС вообще является уникальной;

– объем статистических данных о процессах, протекающих в однотипных СТС, мал или статистические данные полностью отсутствуют;

– статистические данные о характеристиках СТС имеют низкую достоверность;

– проведение периодических проверок статистических гипотез о характеристиках СТС невозможно или сопряжено с существенными трудностями и т.д.

Таким образом, использование теоретико-вероятностных методов не позволяет достаточно эффективно синтезировать модели CALS-процессов, которые не только адекватно отражали бы динамику этих процессов, но и давали бы возможность управлять этими процессами.

Еще одним существенным недостатком существующих моделей CALS-процессов является их информационная направленность, то есть данные модели учитывают лишь информационные взаимодействия между элементами и частями СТС, не требующие заметных затрат энергии и вещества. При этом фактически игнорируется вещественно-энергетическая сущность CALS-процессов, протекающих в СТС. Такое абстрагирование от физической сущности управляемых CALS-процессов не позволяет выявить истинные механизмы интеграции управляемого взаимодействия, энергии, вещества и информации в СТС. А.А. Колесников в своей работе [2] дает характеристику путей исследования СТС: "Существенно важно рассматривать их поведение как с точки зрения динамики, когда доминирующую роль играет энергия, так и с точки зрения протекающих в них информационных процессов, когда главное — в "смысловом" содержании сигналов управления".

Основой для устранения существующих недостатков моделирования CALS-процессов является разработка единой интегрированной модели самой СТС и ее жизненного цикла, позволяющей полномасштабное описание протекающих энергетических процессов, и выступающей в роли единого источника информации для управления этими процессами. Однако сложность создания такой модели неразрывно связана со сложностью структуры самих СТС и протекающих в них процессов.

Таким образом, возникает противоречие между потребностью в разработке интегрированных моделей "СТС – CALS-процессы", позволяющих проводить анализ динамических эволюционных CALS-процессов, протекающих на интервале всего жизненного цикла СТС, и недостаточными возможностями существующего научно-методического аппарата для синтеза таких моделей с целью управления этими процессами.

Решение этой проблемы предлагается искать в создании и использовании закономерных общесистемных эволюционных моделей, которые должны учитывать динамические, параметрические, экономические, энергетические и эксплуатационные CALS-процессы, протекающие в каждой конкретной СТС на всем интервале жизненного цикла.

В качестве универсальной физической величины образования системных (целостных) свойств СТС из множества отдельных компонент предлагается использовать обобщенную физическую величину – энергию.

При рассмотрения энергетических CALS-процессов, протекающих в СТС, будем учитывать, что:

большинство СТС можно отнести к классу закрытых систем, то есть таких систем, через границу которых не происходит обмена веществом с внешней средой, а происходит лишь обмен энергией. Например, электрические системы на всем интервале жизненного цикла практически не изменяют своей массы, так как перенос вещества в токопроводах посредством потока заряженных частиц ничтожно мал. Незначительное изменение массы на практике наблюдается и у механических систем, включающих в свою конструкцию узлы трения, так как существующие смазочные материалы и методы их использования существенно снижают износ трущихся поверхностей;

изменение технического состояния СТС на интервале их жизненного цикла носит динамический характер. Под динамической системой будем понимать такую СТС, для которой однозначно определено понятие состояния как совокупности протекающих через нее энергетических потоков в заданный момент времени и задан оператор, определяющий эволюцию начального технического состояния системы во времени;

при отсутствии восстановления, процессы эволюции технического состояния СТС носят необратимый характер. Под эволюцией технического состояния СТС здесь понимается процесс постепенного и непрерывного перехода технического состояния системы от одного состояния к другому, который проявляется в изменении ее параметров и нарушении процессов функционирования. Характерными признаками эволюционных изменений технического состояния СТС являются физическое изнашивание и старение элементов ее конструкции.

Основным условием для эффективного функционирования CALS-процессов при создании, хранении и эксплуатации СТС является их энергетическая целесообразность, оправданность. Другими словами определенному количеству информации, реализованной в структуре СТС, соответствует строго определенное количество энергии, связанной в этой структуре. Степень структурной сложности СТС соответствует ее энергетическим свойствам. Следовательно, количество информации, заключенной в структуре, обусловлено количеством связанной в ней энергии.

Выделим три основные компоненты общей энергии СТС:

– внутренняя энергия – это энергия, характеризующая структурное и функциональное состояния конструкции системы, и направленная на сохранение основных системных свойств СТС;

– энергия, протекающая через СТС и обеспечивающая целевое ее функционирование;

– энергия, рассеиваемая в конструкции СТС и приводящая к ее деградации, а также к виртуальным перемещениям параметров состояния и структуры системы.

Целостность системы – это принципиальная несводимость ее свойств к сумме свойств составляющих элементов и невыводимость из последних свойств целого.

Под виртуальными перемещениями параметров СТС будем понимать изменение положения (перемещение) в пространстве состояний параметров функциональной модели системы, не приводящие к нарушению функциональной и структурной целостности СТС.

Диссипация энергии – это переход части энергии упорядоченного процесса в физической системе в другие виды энергии (тепловую, звуковую, световую, волновую, электромагнитную и др.), не участвующие в процессе производства полезной работы системой. Например, диссипация энергии механических систем означает переход части их механической энергии в другие формы за счет наличия сил сопротивления.

Внутренняя энергия системы – это энергия движения и взаимодействия частиц, из которых состоит тело. Внутренняя энергия тела не зависит от положения тела относительно других тел и от скорости движения тела. Согласно понятиям классической физики [3], внутренняя энергия тела слагается:

из энергии хаотического движения молекул;

из потенциальной энергии атомов, образующих молекулу или кристаллическую структуру;

из внутриатомной энергии и т.д.

Однако, анализ теоретических исследований в области физики (и особенно термодинамики) [4] показывает, что сохранение энергии в сложных технических системах можно формулировать и использовать только на языке макропеременных.

Внутренняя энергия системы может проявляться в форме рассеиваемой во внешнюю среду теплоты или в форме работы, совершаемой системой в среде.

Источниками внутренней энергии являются конструктивные элементы СТС. Связанная в структуре СТС внутренняя энергия влияет на ее техническое состояние и употребляется на создание, восстановление и поддержание на заданном архитектурном уровне этой структуры.

Часто в литературе в качестве внутренней энергии используют понятие поверхностной энергии, которая закладывается при изготовлении детали (узла) и выступает в роли начальных условий динамического процесса ее поверхностных разрушений (деградаций) [5]. Поверхностная энергия пропорциональна твердости поверхности. Расходование поверхностной энергии пропорционально степени изнашивания взаимодействующих поверхностей и характеризуется диссипацией звуковой, тепловой, электрической и механической энергий. Динамическое нагружение поверхностей трения пропорционально росту деградационных процессов в материале.

Необходимый запас внутренней энергии СТС рассчитывается и закладывается на этапах ее проектирования, при этом энергетические расчеты производятся с целью определения таких энергетических взаимодействий между элементами конструкции СТС, которые бы обеспечили:

– целостность системы на всем интервале жизненного цикла при максимально возможных эксплуатационных нагрузках;

– выполнение целевого функционального назначения системы.

Проходящие через СТС потоки внешней энергии изменяют характеристики источников внутренней энергии путем передачи части энергии.

Анализ показывает, что определение значения внутренней энергии сложной технической системы может быть затруднено необходимостью учитывать энергетические процессы различной природы.

На практике мощность источников внутренней энергии СТС всегда ограничена и соизмерима с минимальной мощностью, необходимой для обеспечения функциональных поведений системы. Следствием ограниченности мощности источников внутренней энергии является зависимость значений выходных координат СТС от характера нагрузки. В свою очередь характер и динамические режимы работы СТС определяются внешней нагрузкой на ее выходе. При соизмеримости входной мощности с состоянием СТС (внутренней энергией), с одной стороны, наблюдается влияние режимов работы (динамики) СТС на характер изменений и значения ее выходных (энергетических) координат, с другой стороны. Следствием отклонения выходных координат от их номинальных значений является изменение качества функционирования СТС.

СТС можно рассматривать как аккумулятор энергии, которая накапливается в структуре системы, а затем тратится на образование системных свойств. Следовательно, понятие "целостность

системы" можно трактовать как ее способность аккумулировать энергию. При распаде системы на исходные элементы в среду выделяется энергия, которая была сосредоточена в связях исходных элементов.

Таким образом, в энергетическом определении СТС – это целостная совокупность элементов, обладающая способностью аккумулировать энергию, поглощая ее из среды, за счет определенного взаимодействия элементов, а также отдавать энергию в виде полезной работы и диссипации в элементах конструкции и во внешнюю среду.

Любая СТС, через конструкцию которой проходит поток энергии (мощности), при длительной эксплуатации "... стремится при своем свободном движении либо к равновесию, либо, в более общем случае, к движению консервативной системы с меньшим числом степеней свободы" [6]. Потеря степеней свободы системы характеризует переход конструктивной деградации системы в ее деградацию функциональную. Следовательно, количество энергии, прошедшей через систему, определяет ее техническое состояние.

Как известно, свойства любой физической системы могут быть выражены с помощью системы уравнений, устанавливающих соотношение потоков энергии или мощности, которые имеют место между системой и окружающей средой. Наиболее полно такие зависимости можно описать Гамильтоновой системой дифференциальных уравнений, которые легко приводятся к канонической форме Коши. Они являются системой обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка. В общем случае, входящие в них коэффициенты являются зависимостями от кинетической, диссипативной и потенциальной энергий соответственно. Одновременно, эти коэффициенты являются функциями от параметров компонентов СТС, то есть уравнения Гамильтона позволяют связать воедино энергетические и параметрические (информационные) характеристики эволюционных процессов, протекающих в СТС.

Таким образом, интегрированная динамическая модель СТС может быть разделена на две части – энергетическую и информационную. Такая интегрированная модель должна включать:

подмодели компонент СТС, в общем случае представляющие собой упорядоченную иерархическую структуру;

подмодель потока энергии через компоненты СТС;

подмодели виртуальных перемещений параметров компонент СТС, обусловленные протекающими через нее энергетическими потоками.

Полученная модель позволяет обоснованно определять требования к массиву и структуре базы данных информационного обеспечения CALS-систем, а также позволяет интегрировано учитывать изменение состояния СТС, вызванные как наработкой, так и сроком службы (эксплуатации, хранения).

## Список литературы


1. Информационно-вычислительные системы в машиностроении CALS-технологии /*Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, В.В. Павлов, А.В. Рыбаков* - М: Наука, 2003, 292 с.

2. *Колесников А.А.* Когнитивные возможности синергетики. Вестник Российской Академии наук, 2003, том 73, N8, с.727-734.

3. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теоретическая физика: Учеб. пособие. В 10-ти т. Т. I. Механика. М.: Наука. 1988 – 216 с.

4. *Пригожин И., Кондепуди Д.* Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. М.: Мир, 2002, – 462 с.

5. *Крагельский И.В., Щедров В.С.* Развитие науки о трении. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1956. - 237 с.

6. *Биркгоф Дж. Д.* Динамические системы. – Ижевск: Издательский дом "Удмурдский университет", 1999. 408 с.

УДК 005.311.2:004.94

*О.В. Заріцький, кандидат технічних наук*
*(Фірма «Т.М.М.»-ТОВ, Україна)*

# ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СПЕЦІАЛІЗОВАНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ CALS-ТЕХНОЛОГІЇ

*Доповідь присвячена питанням впровадження спеціалізованого програмного забезпечення на сучасних підприємствах з метою реалізації основних принципів CALS-технологій*

CALS (Continuous Acquisition and Life cycle Support) – безперервна інформаційна підтримка поставок та життєвого циклу – сукупність принципів і технологій інформаційної підтримки життєвого циклу (ЖЦ) продукції на всіх його стадіях, заснована на використанні єдиного інформаційного простору (інтегрованого інформаційного середовища), яка забезпечує єдині способи управління процесами і взаємодії всіх учасників цього циклу: замовників продукції (включаючи державні установи і відомства), постачальників (виробників) продукції, експлуатаційного і ремонтного персоналу, реалізована у відповідності з вимогами міжнародних стандартів, які регламентують правила управління і взаємодії переважно за допомогою електронного обміну даними.

Концепція та ідеологія CALS-технологій (рис.1) зародилася у військово-промисловому комплексі у 70-х роках та отримала подальший розвиток у цивільній промисловості.

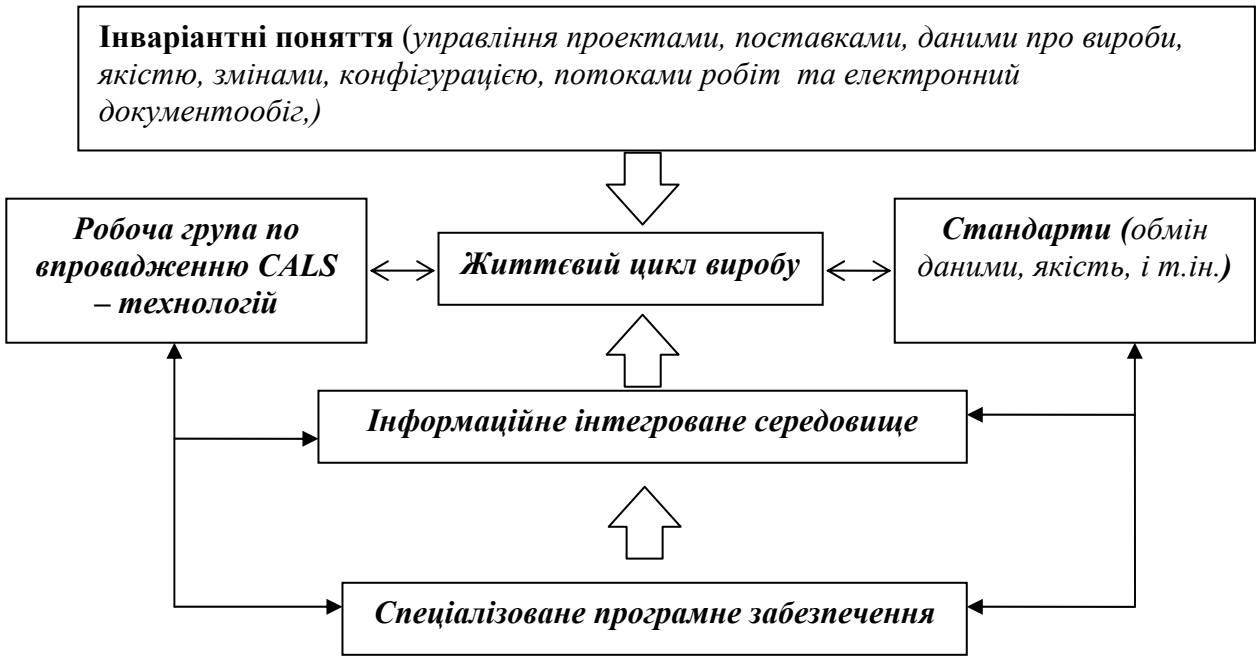



Рис.1. Концепція та ідеологія CALS-технологій

Сучасний стан речей є таким, що:

1. Практично опрацьовані життєві цикли виробів та проектів у вигляді альбомів схем за допомогою програмного забезпечення (ПЗ) для розробки процесних моделей та моделювання життєвого циклу виробів (проектів) – BPWin, ERWin, ARIS і т.ін.
2. Накопичено великий обсяг знань по інваріантним поняттям у вигляді стандартів управляння проектами (PMBOK різних версій), управління ресурсами (поставками) MRP-I, MRP-II, управління якістю (стандарти серії ISO 9000), класифікатори документації, потоків робіт і т.ін.

3. Сучасний рівень розробки спеціалізованого ПЗ для автоматизації тих чи інших процесів компанії в рамках зазначених вище інваріантних понять сягнув найвищого рівня у останні 10 років, що дає можливість реалізовувати практично всі необхідні концепції та ідеології.

4. Створені різноманітні комітети, по розробці та уніфікації різноманітних стандартів, які регламентують як процеси виготовлення виробів, так і показники самих виробів.

5. Розроблено безліч стандартизованих методик впровадження спеціалізованого ПЗ для реалізації інтегрованих інформаційних технологій, які мають спільне коріння с точки зору підходів та етапності.

Таким чином, як бачимо проект по впровадженню спеціалізованого ПЗ для реалізації CALS-технологій з технічної точки зору відпрацьованим, але залишається найбільш складним з точки зору координації роботи співробітників різноманітних підрозділів підприємства та прийняття рішення на початковій фазі проекту щодо вибору ПЗ.

Необхідність формування робочих груп та координації роботи цих фахівців з роботою робочої групи по впровадженню ПЗ від розробника є доволі складною задачею та вимагає від керівника підприємства досвіду та постійної підтримки проекту з точки зору мотивації співробітників.

Оскільки від формування проектної групи залежить результат проекту, на основі досвіду запропоновано наступний склад:

До складу проектної групи з боку розробника повинні входити:

- Керівник проекту.
- Функціональні консультанти по функціональних модулях спеціалізованого ПЗ.

До складу проектної групи з боку компанії повинні входити:

- Керівник проекту.
- Функціональні консультанти по функціональних напрямках діяльності компанії.
- Системний адміністратор/адміністратор БД/МЕРЕЖЕВИЙ адміністратор.

Найбільш відповідальними є ролі керівників проекту.

Керівник проекту від Замовника відповідає за щоденне управління діями фахівців компанії відповідно до плану проекту, він здійснює керівництво членами проектної групи компанії. Необхідне повне розуміння завдань проекту для формування основи для рішення проблем, конфліктів інтересів, пошуку компромісів. Керівник проекту відповідає за забезпечення такими ресурсами, як приміщення, офісне устаткування, комп'ютерне устаткування, матеріали, забезпечує доступність ключових користувачів, бере участь в розподілі часу за проектом. Відстежує прогрес проекту по ключових етапах, відповідність і якість робіт, а також відповідає за організацію перегляду і затвердження вихідних документів.

Керівник проекту від Виконавця здійснює керівництво консультантами групи впровадження, повинен розуміти завдання проекту і мати ясне розуміння про шляхи їх досягнення. Керівник проекту вирішує конфлікти і ухвалює рішення про винесення проблем на обговорення в комітеті, що управляє. Він відповідає за те, щоб проект не виходив за встановлені рамки і межі. Керівник проекту відповідає за складання плану робіт, а також відстежує відповідність планових і фактичних термінів, ресурсів, звітів, вихідних документів і т.д.

Впровадження сучасних систем для реалізації CALS-технологій будується як правило на базі методології AIM (Applications Implementation Methodology), яка є детальним описом завдань, що виконуються в ході проекту, з вказівкою послідовності виконання і відповідальних ролей проектної групи. Відповідно до методології впровадженні, в рамках проекту виконуються наступні процеси впровадження (відрізняються не суттєво в залежності від розробника ПЗ):

1. **Архітектура бізнес-процесів** - включає аналіз бізнес-процесів організації, співвідношення їх з потребами і прикладною системою, яка впроваджується. Результатом виконання завдань, що входять в даний процес, є підготовлений комплект оптимізованих специфікацій, що відображає баланс змін в організації і прикладній системі. Вихідний документ процесу - Це Модель майбутніх процесів.

Як правило робочі групи користуються базами даних процесів, які напрацьовані різноманітними комітетами із стандартизації та представляють собою так звані найкращі практики у певних сферах діяльності (дистрибуцію, логістика, продаж і т.ін.)

2. **Визначення бізнес-вимог** - результатом виконання завдань, що входять в даний процес, є опис вимог компанії. В ході цього процесу розробляються детальні моделі бізнес-процесів, які потім деталізують до рівня конкретних функцій, які повинна виконувати система до елементарного кроку бізнес-процесу.

3. **Складання бізнес-вимог** - в ході виконання завдань, що входять в даний процес, проводиться аналіз того, яка функціональність прикладного ПЗ і яким чином може використовуватися для реалізації функціональних можливостей, необхідних компанії. У цьому процесі остаточно визначаються майбутні бізнес-процеси компанії, яка інформація буде зберігається в системі і які доопрацювання необхідно зробити, а також значення параметрів настройки прикладного ПЗ.

4. **Прикладна і технічна архітектура** - протягом процесу проектується архітектура інформаційної системи.

5. **Конвертація даних** - основна частина роботи полягає в підготовці даних для конвертації, визначенні надійних джерел, очищенні даних.

6. **Документування** - створюється документ “Стратегія і потреби в документації”, який визначає - які саме документи і кроки по їх розробці реалізуються.

7. **Тестування бізнес-системи** - на основі вимог до функціональності системи, зібраних і деталізованих в ході процесів визначення і відображення бізнес-вимог, розробляються сценарії тестування, і проводиться перевірка системи на виконання вимог, що реалізовується.

8. **Тестування продуктивності** - включає проектування, розробку і виконання тестів по продуктивності.

9. **Адаптація і Навчання** - цей процес розбивається на дві частини - навчання проектної групи, з якого починається проект по впровадженню, і навчання кінцевих користувачів, яким проект закінчується. Навчання кінцевих користувачів, а так само розробка інструкцій користувачів і призначених для користувача меню проводиться учасниками проектної групи від компанії.

**10. Перехід до експлуатації** - в ході цього процесу розглядаються всі питання, пов'язані з введенням в експлуатацію системи і її подальшим супроводом. В ході цього процесу проводиться настройка параметрів системи для промислової експлуатації.

Виділяються наступні фази:

**Визначення стратегії** - після закінчення даної фази визначаються сукупні бізнес-вимог Компанії. Надалі вони можуть уточнюватися і видозмінюватися в ході відображення на функціональність спеціалізованого ПЗ, але появи нових бізнес-вимог не відбувається.

**Аналіз** - після закінчення даної фази майбутні бізнес-процеси компанії зафіксовані і визначено, як вони будуть реалізовані за допомогою спеціалізованого ПЗ. Так само точно визначено, які бізнес-вимоги не можуть бути задоволені за допомогою стандартної функціональності і яка додаткова розробка необхідна.

**Проектування** - в ході даної фази зокрема проводиться створення детальних специфікацій для додаткової розробки (функціональний і технічний дизайн) і розробка сценаріїв тестування.

**Реалізація** - кодування і тестування всіх модифікацій і нових розробок, включаючи розширення системи, конвертацію даних і доопрацювання інтерфейсів.

**Запуск** - після закінчення даної фази всі додаткові розробки завершені, приймальні тести проведені, призначена для користувача документація розроблена.

**Експлуатація** - в ході цієї фази завершується навчання кінцевих користувачів, проводиться конвертація даних і система вводиться в експлуатацію.

Розглянемо так би мовити нульові початкові умови проекту, які необхідно обов'язково брати до уваги. Як говорилося раніше сучасний розвиток ПЗ та доступність його на ринку неліцензійного ПЗ дав змогу багатьом підприємствам автоматизувати певні управлінські та виробничі процеси. Такі проекти здебільше носили хаотичний характер, що призвело до використання різноманітного ПЗ на одному підприємстві.

Таким чином розпочинаючи проект під час його першого етапу, робоча група повинна визначити крім описання процесів також необхідність та подальшу долю існуючого ПЗ. Як правило існує два шляхи: залишити існуюче ПЗ та інтегрувати його з новим, або повністю відмовитися від старого ПЗ.

Вибір одного з етапів передбачає певний аналіз щодо об'ємів робіт та їх доцільності. Так повна відмова призводить до необхідності формування баз даних та імпорту їх у нове ПЗ, а інтеграція викличе необхідність написання великої кількості різноманітних інтерфейсів для подальшої роботи різнорідного ПЗ. Економічне обґрунтування та доцільність повинні бути зроблені на початку проекту.

Бувають випадки, коли спеціалізоване ПЗ є доволі складним та не дозволяє автоматизувати певні сфери діяльності, що автоматично приводить до необхідності інтеграції з існуючим.

Доволі складним завданням є конвертація даних із старої системи в нову, що призводить практично до створення проекту в проекті. Найбільш ризиковим і витратним є процес співіснування двох систем паралельно деякий час, що є необхідним з точки зору тестування на адекватність опрацювання процесів новою системою.

Існує декілька методик, які дозволяють по-перше вияснити чи готове підприємство до реалізації такого проекту, по-друге визначитися з командою по впровадженню такого ПЗ.

## Висновки

Проекти по впровадженню спеціалізованого програмного забезпечення є доволі складними з точки зору вибору оптимальної конфігурації, кількості модулів, функціоналу у зв'язку з великою кількістю вже існуючого ПЗ на підприємстві. Такі проекти несуть певну долю ризику з точки зору їх успішного завершення, що пов'язане з так званим людським фактором (наявність висококласних фахівців, демотивація співробітників при затягуванні проекту у часі і т.ін.). Головним є те, що людський фактор відіграє все більшу роль у сучасних умовах розвитку інформаційних технологій ніж технічний фактор. Так аналіз проектів, які здійснювалися автором на сучасних підприємствах, показує що більше ніж 60% з них було важко реалізувати (зрив строків, неякісна підготовка певних етапів і т.ін.) саме за причини людського фактору. Найбільш складними етапами проекту такого рівня є: визначення стратегії, де приймаються рішення щодо ПЗ; конвертація даних із старої системи в нову, співіснування двох систем одночасно.

## Список літератури

1. Компьютерно-интегрированные производства и CALS-технологии в машиностроении. Под ред. д-ра техн. наук, проф. *Б.И. Черпакова.* М.: ГУП «ВИМИ», 1999. – 512 с.

2. *Okino N.* Object and Operation dualism for CAD/CAM architecture. // An-nals of the CIRP, 1983, v. 34, №1, p.p. 179 – 182.

3. *Краюшкин В.* Современный рынок систем PDM. «Открытые системы» , 2000, № 9.

4. *Н. Дубова.* Системы управления производственной информацией. «Открытые системы», 1996, №3.

5. *Марка Д., МакГоуэн К.* Методология структурного анализа и проектирования. Пер. с англ. М.:1993, 240 с.,ISBN5-7395-0007-9.

УДК 005.311.2:004.94

*І.М. Мужик, заст. директора з організаційно-виховної роботи ІІДС*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ КОРПОРАТИВНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ВИЩОГО НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ

*В доповіді представлено концептуальний підхід до побудови корпоративної інформаційної системи вузу на основі сучасних ISO стандартів та досягнень в галузі розробки автоматизованих систем.*

Глобальна комп'ютеризація інформаційних процесів охоплює всі види діяльності в вищих навчальних закладах. Практично кожний співробітник і викладач користується різноманітними інформаційними системами і програмами, готуючи звіти, документи та інші інформаційні матеріали. Нажаль, до сьогоднішнього часу у багатьох вищих навчальних закладах України не розроблені та не впроваджені корпоративні інформаційні системи, які б створили єдине інформаційне середовище та автоматизували функції управління, планування та аналізу.

Автор в доповіді представляє концепцію побудови корпоративної інформаційної системи вузу на основі функціональних вимог міжнародних ISO стандартів та досвіду провідних фірм розробників інтегрованих автоматизованих систем.

Сучасні вищі навчальні заклади по своїй суті є великими науково-навчальними центрами, що володіють значними матеріально-технічною, методичною та науковими базами, мають в своєму складі велику кількість структурних підрозділів, зокрема, і територіально розосереджених, реалізують навчальні, наукові, науково-виробничі та науково-дослідні проекти за багатьма напрямами. Очевидно, що для вузів є актуальним питання ефективного використання всіх видів ресурсів, зокрема, наукових, методичних, матеріальних, кадрових та інших. Високу ефективність використання ресурсів можна досягти шляхом впровадження сучасних методологій та концепцій управління, технічною базою яких є комплексна (корпоративна) інформаційна система (КІС), яка забезпечує вирішення наступних задач:

- проведення моніторингу всіх напрямків діяльності вузу, забезпечивши при цьому належний рівень його "інформаційної" прозорості;
- оцінку ефективності роботи на базі достовірної інформації;
- реалізацію процесу стратегічного управління, можливість формулювання стратегічних цілей в термінах оперативних завдань співробітників і управління ресурсами, контроль за їх виконанням;
- контроль над досягненням поставлених цілей, аналіз невідповідностей та можливість їх корегування.

Для вирішення поставлених задач до функціонального складу КІС повинні входити ряд компонент, зокрема, цільового управління, моделювання діяльності, бюджетування, моніторингу, системи, що виконують функції накопичення та зберігання інформації [1].

Більшість вищих навчальних закладів України використовують інформаційні системи, реалізовані на різноманітних апаратних та файлових платформах. Навіть у межах одного вузу це можуть бути автономні файлові системи, системи, що використовують локальні чи мережеві технології, системи побудовані на серверах реляційних баз даних. Як результат, у багатьох навчальних закладах, за умови неодноразового дублювання даних в різних системах, ректорат та основні служби планування змушені працювати в умовах відсутності інтегральної інформації про результати роботи вузу або суперечливої інформації, що надходить з різних джерел .

Тому, для більшості навчальних закладів залишається актуальною проблема побудови єдиного інформаційного простору, існування якого неможливе без впровадження КІС, що охоплює всі сторони діяльності вузу. Інтеграція існуючих інформаційних систем вузу в

єдину комплексну систему може буди одним з шляхів вирішення даного питання. Проблеми такої інтеграції активно обговорюються на сторінках багатьох видань, часто при цьому обмежуючись концептуальними викладками типу інтеграцію можна провести шляхом обміну даними чи логіки за принципом один до одного, організацією деякої централізованої структури (шини, інтеграційної платформи), відповідальної за інтеграцію систем, організацією зовнішніх інтерфейсів на основі Web-технологій, тощо [1,2]. Далі концептуальні викладки обриваються, користувачу пропонуються сугубо практичні питання впровадження тих чи інших технологій. Як результат, ряд питань, що потребують розуміння до початку процесу інтеграції залишаються поза увагою.

Автоматизацію інформаційної діяльності переважна більшість вузів почала з впровадження локальних, з інформаційної та функціональної точки зору, систем. При впровадженні таких систем за основну мету ставилось автоматизація роботи окремо взятого підрозділу чи процесу, накопичення та зберігання даних, що стосуються даного підрозділу або процесу. Наприклад, система "Деканат" направлена в основному на облік студентів, їх персональних даних, стану виконання ними навчального плану, формування первинних облікових документів, оформлення різного роду довідок. Як правило, подібні системи не включають до своїх баз дані щодо робочих та робочих навчальних планів, дані про викладачів, робочі навантаження та іншу інформацію, що стосується навчального процесу. Тому подібні системи не дають можливість провести повноцінний аналіз роботи факультету хоча би в межах навчальної роботи, оцінити ефективність використання ресурсів, змоделювати перспективу. Зосередження на роботі з даними в локальних системах привело до того, що по за увагою залишились власно функції управління.

Корпоративні інформаційні системи у більшості вузів впроваджені або впроваджуються як розвиток локальних систем, успадкувавши ідеологію їх побудови. Серед функцій, що виконують системи, в основному вкладений перелік робіт інженерно-технічного складу вузу та підготовка звітних форм за підрозділами чи напрямками роботи. Без сумніву, усунення рутинних операцій, облік ресурсів за умови забезпечення належного рівня достовірності даних, достовірні та в короткі терміни оформлені звіти дуже важливі для вузу в цілому та ректорату зокрема. Але, сам ректорат та служби на яких покладені функції стратегічного планування вузом, часто виявляються виключеними з інформаційного контуру КІС, хоча за покладеними функціями мали би бути їх головними споживачами.

Виходячи з функцій, покладених на вищий менеджмент вузу, можна говорити про функції, які повинна реалізувати КІС. Це в першу чергу набір процедур, направлених на оптимізацію діяльності вузу з точки зору ефективності, зокрема планування, бюджетування, прогнозування діяльності, моніторингу стану навчального закладу. Очевидно, впровадити систему, що виконувала би зазначені функції зразу, без проведення ґрунтовної підготовки, неможливо, що найменше, повинні бути бази даних, необхідні для роботи системи. Не обов'язково це повинні бути високі за вартістю ERP системи, або комплексна система, побудована за одною технологією з одним банком даних, скоріше навпаки. При вирішенні поставлених задач до ряду інформаційних зрізів виникне необхідність включити і неструктуровані дані, а вписати їх в традиційний інформаційний ландшафт системи не зовсім просто.

Разом з тим, існує міжнародний досвід розробки і впровадження КІС, зокрема для таких об'ктів автоматизації, як і вузи. Існують вимоги міждержавних інтеграційних стандартів серії ISO. Так, стандарт ISO 15704 визначає архітектуру установи (EA, enterprise architecture), яка повинна включати роль кадрів, опис процесів та представляти всі допоміжні технології [3, 4]. Іншими словами, EA це модель установи, яка складена з елементів та міжелементних відношень. А це значить, що установу, зокрема і вищий навчальний заклад можна представити у вигляді EA набором модулів та зв'язків між ними. Ідея використання EA в інформаційних технологіях не нова, скоріше добре забута стара. Архітектурні методики у прикладних програмах управління установами почав використовувати Девід Уолкер, директор з архітектурних розробок одного з підрозділів корпорації IBM в 60-х роках

минулого століття. Напрямок ЕА до останнього часу займав досить скромне місце серед IT технологій, в цьому сегменті працюють до десятка компаній з середнім доходом 10-15 млн.дол [4].

Така позиція ЕА серед інформаційних технологій управління установами не зовсім заслужена. На наш погляд архітектури, орієнтовані на сервіси та управління бізнес-процесами можуть стати містком між функціональним підходом, характерним для бізнесу та об'єктно-орієнтованим підходом, характерним для IT. Корпоративна інформаційна система є ніщо інше, як відтворення архітектури, при чому, можна стверджувати, чим повніше це відтворення і повніше представлені відношення між модулями, тим більш ефективною буде робота системи в цілому. Таким чином можна говорити про модульну структуру КІС, представши її у вигляді набору автономних модулів, кожний з яких забезпечує виконання пов'язаних функцій, може обробляти дані, оперувати ними і взаємодіяти між собою та навколишнім середовищем через обмін повідомленнями. Задача проектування КІС зводиться до групування функцій та впровадження механізму обміну повідомленнями між ними, при цьому актуальним є питання ідентичності інформації в різних модулях.

Компонентизація монолітних інформаційних систем (технологічне оформлення окремими модулями) – тенденція сьогоднішнього дня. Але не всі необхідні сервіси можуть бути взяті з існуючих систем, а вимоги до зміни інтегрованих функцій будуть виникати постійно, збільшуючи вартість утримання КІС. Відмінності запропонованого підходу до проектування КІС від тих, що склалися традиційно полягають у наступному:

- автономність модулів, модуль створюється, впроваджується та удосконалюється незалежно від інших;
- поєднання в одному модулі функцій збереження та обробки даних;
- модуль має свої межі, за ними від представлений виключно повідомленнями.

Модульні технології будівництва широко відомі, застосовуються в різних галузях, відомі їх переваги, зокрема, унікальна можливість поєднання суперечливих властивостей – стабільності та динамічності. Стосовно КІС це значить що вона легко зможе трансформуватись за вимогами користувачів, забезпечивши при цьому працездатність. Крім того не має потреби одночасно впроваджувати систему в цілому, план впровадження системи може бути розроблений з урахуванням конкретних потреб вузу, можна зберегти інвестиції, вкладені у впровадження існуючих інформаційних системи, досить їх доповнити механізмом обміну повідомленнями.

## Висновки

Таким чином, запропонована концепція побудови корпоративної системи інформаційної підтримки функціональних процесів вузу, в основі якої архітектурна ЕА-модель, яка забезпечує модульну та покомпонентну побудову системи з поетапним вводом в експлуатацію та достатнім для роботи функціоналом.

## Список літератури


1. *Демурчев Н.Г.* Применение аналитических информационных систем для повышения эффективности управления вузом / Н.Г. Демурчев, В.В. Копытов // Информационная среда вуза XXI века : II Всероссийская научно-практическая конференція, 15-18 сентября 2008 г.: тезисі докладов – Петрозаводськ, 2008. – С. 74

2. *С.Костяков* Фокус на процесах / *Костяков С.* // Корпоративные системы. – 2008 - 8 (202) С. 15-18

3. ISO 15704:2000. Industrial automation systems — Requirements for enterprise-reference architectures and methodologies.

4. *Калянов Г.Н.* Архитектура предприятия и инструменты ее моделирования / Г.Н. Калянов // Автоматизация в промышленности. – 2004 - №7 С. 9-12.

УДК 678.057.5

*П.І. Чередніченко, д-р техн.наук,*
*О.В. Бакалов, асистент,*
*В.Г. Бакалов, канд.техн.наук*
*(Чернігівський державний технологічний університет, Україна)*

# МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ ПЛОСКОЇ ПОЛІМЕРНОЇ ПЛІВКИ

*Отримані рівняння залежності ширини плівки від початкової ширини плівки та коефіцієнту тертя. Проведені досліди та побудовано залежність коефіцієнта тертя від температури. Експериментально доведено адекватність теоретичних залежностей ширини плівки від відстані між охолоджуючим валком та головкою.*

Плоскощілинні головки дозволяють отримувати розплав полімеру у вигляді плівки, яка потім витягується між головкою та охолоджуючими валками. На виході з головки товщина плівки зменшується більш, ніж у двадцять разів завдяки різницям швидкостей плівки на виході та на охолоджуючих валках. Процес витягування плівки залежить від багатьох параметрів, тому на сьогодні методика його розрахунку потребує подальших детальних досліджень.

В роботі Шаповала В.М. [1] отримані рівняння для визначення кінцевої товщини плівки в залежності від співвідношень ширини плівки та швидкостей на вході та в кінці процесу витягування. Встановлено, що напруження в поперечному напрямку плівки дорівнює половині напруження в поздовжньому напрямку. В наведених залежностях невідомі: кінцева ширина плівки на охолоджуючому валку, швидкість виходу розплаву з головки. Теоретичне та експериментальне дослідження цього процесу дозволить контролювати процес її виготовлення, а також підвищити якість плівки.

Розглянемо плівку, що потрапляє на валок. На неї діють такі сили: поздовжня розтягуюча сила $F$; поперечна сила $F_{cm}$, яка стягує плівку до осі; сила тертя плівки з валком $F_{mp}$ (будемо вважати, що всі наведені сили прикладені в одній точці торкання).

Оскільки вісь $0X$ є симетрією плівки в поперечному напрямку, то на осі поперечної сили не буде. Розіб'ємо плівку на смуги і прикладемо до них наступні сили, які показані на рисунку 1.

Виділена смуга знаходиться у стані рівноваги, коли сума сил, які діють на неї вздовж осі $Y$ дорівнює нулю:

$$F_{mp} + F \cdot \sin\theta - F_{cm} = 0 . \qquad (1)$$

Силу тертя виразимо через рівняння:

$$F_{mp} = f \cdot F , \qquad (2)$$

де $f$ – коефіцієнт тертя розплаву полімеру з матеріалом, який ламінується.

Поперечна сила $F_{cm}$ змінюється від нуля на осі $OX$ до максимального значення $F/2$, яке встановлено в роботі Шаповала В.М. [1]. Тоді рівняння для знаходження поперечної сили $F_{cm}$ буде мати наступний вигляд:

$$F_{cm} = \frac{F}{2}\frac{2z}{b} = F\frac{z}{b}, \qquad (3)$$

де $z$ – поточна координата ширини плівки на охолоджуючому валку;

$b$ – ширина плівки на охолоджуючому валку.

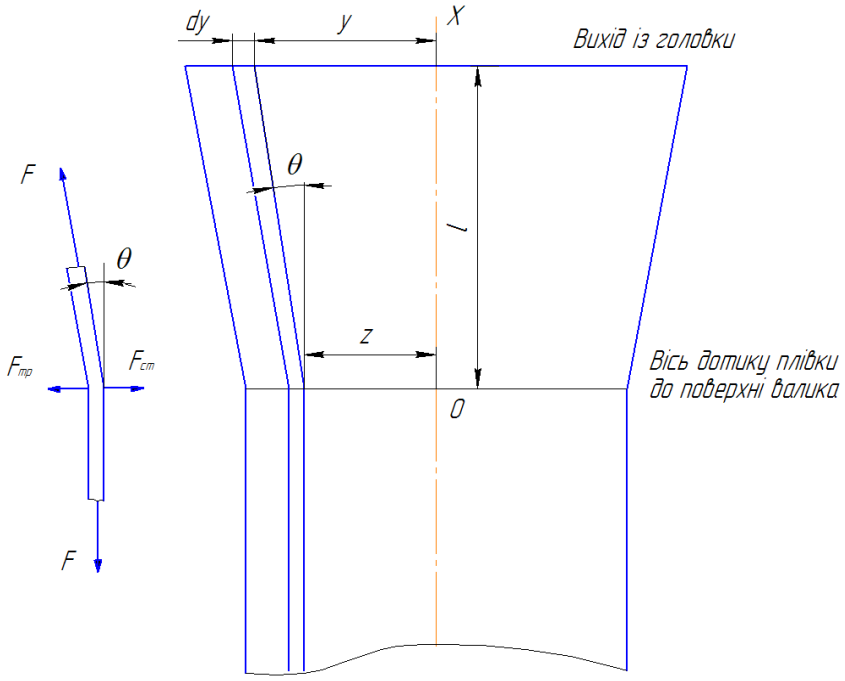



Рис. 1 Схема дії сил на ділянці звужування плівки між головкою та валком

Розраховуємо синус кута $\theta$ за формулою:

$$\sin\theta = \frac{y-z}{\sqrt{l^2+(y-z)^2}}, \tag{4}$$

де $l$ – відстань від головки до охолоджуючого валка;

$y$ – поточна координата ширини плівки на виході із плоскощілинної головки.

Підставляючи рівняння (2-4) в рівняння (1), отримуємо:

$$f + \frac{y-z}{\sqrt{l^2+(y-z)^2}} - \frac{z}{b} = 0. \tag{5}$$

Слід відзначити, що із співвідношення перерезів плівки після головки і на валках маємо:

$$\frac{y}{b_0} = \frac{z}{b}, \tag{6}$$

де $b_0$ – ширина плівки на виході із плоскощілинної головки;

З рівняння (6) виразимо $Y$ і, підставивши його в рівняння (5), отримуємо:

$$f + z\left(\frac{b_0-b}{\sqrt{l^2b^2+z^2(b_0-b)^2}} - \frac{1}{b}\right) = 0. \tag{7}$$

Враховуючи, що на краю плівки координата $z$ дорівнює $b$, перетворимо рівняння (7) до виду:

$$b = b_0 - l\frac{1-f}{\sqrt{1-(1-f)^2}}. \tag{8}$$

Таким чином, ширина витягнутої плівки ($b$) залежить від початкової ширини ($b_0$), довжини зони витягування ($l$), а також від коефіцієнта тертя ($f$). Із рівняння (8) видно, що ширина витягнутої плівки ($b$) лінійно зменшується зі зростанням довжини зони витягування ($l$) при сталому значенні коефіцієнту тертя ($f$).

Якщо відомі коефіцієнт тертя і довжина зони витягування, можна розрахувати ширину витягнутої плівки. Товщина витягнутої плівки $\delta_1$ розраховується з рівняння балансу витрат плівки в перерізах на виході із головки і на валку по рівнянню:

$$\delta_1 = \delta_0 \frac{b_0 \upsilon_0}{b \upsilon_1}, \tag{9}$$

де $\upsilon_0, \upsilon_1$ – швидкість плівки відповідно на виході із плоскощілинної головки та на охолоджуючому валку.

Рівняння (8-9) дозволяють розрахувати товщину та ширину полімерної плівки після охолоджуючих валків.

Для перевірки приведених вище рівнянь були проведені досліди по визначенню коефіцієнта тертя між плівкою та папером при різних температурах, а також по визначенню залежності зміни ширини кінцевої плівки від відстані між головкою та охолоджуючим валком.

Згідно методики вимірювання коефіцієнта тертя ковзання статичного по ГОСТ 10354-82 [2] рекомендується використовувати прилад у вигляді нахиленої площини.

Для вимірювань необхідно підготувати по 3-5 зразків розмірами 100х320 мм і 60х120 мм. При визначенні коефіцієнта тертя підготовлений зразок полімерної плівки розміром 100х320 мм розміщується уздовж нахиленої площини, нижній край зразка згинається до нижньої кромки плити і фіксується затискачами. На бруску навантаження двома затискачами закріплюється зразок паперу 60х120 мм. В нахиленій плиті вмонтовані електронагрівачі, які забезпечують нагрівання плівки до температури від 90 до 150 ºС.

Досліди рекомендується проводити при температурі повітря 22,0±2,0ºС і відносній вологості повітря 50±5,0%. Перед проведенням випробувань плита приладу встановлюється в горизонтальне положення по рівню, шкала кута повороту на відмітку «0». На плиту встановлюють брусок навантаження, обгорнутий папером, і повільним обертанням диска плита приводиться в нахилене положення. У момент початку руху бруска по нахиленій площині за шкалою фіксується кут нахилу плити $\alpha$. Тоді статичний коефіцієнт тертя розраховується за формулою:

$$f_{cm} = tg\alpha, \tag{10}$$

де $f_{cm}$ – статичний коефіцієнт тертя.

Після трьох дослідів при певному значенні температури за остаточний результат приймається середнє арифметичне отриманих вимірювань. При кожному значенні температури похибка паралельних дослідів не перевищує 9%. На рисунку 2 наведені результати дослідів, які показують, що з підвищенням температури до 110ºС поліетилен розм'якшується, і його коефіцієнт тертя по паперу зростає. З подальшим підвищенням температури (понад 110ºС) коефіцієнт тертя зменшується, тому що поліетилен при такій температурі стає схожим на мастило.

При проведенні експериментів на промисловій установці вимірювалась довжина зони витягування та ширина кромок, що відрізуються. Слід відзначити, що довжина зони витягування на промисловій установці регулюється гідравлічною системою. Ця система піднімає та опускає охолоджуючий барабан, змінюючи тим самим відстань між плоскощілинною головкою та лінією контакту між полімерною плівкою та охолоджуючим валком.

Експериментальні дані ширини витягнутої плівки від довжини зони витягування представлені у вигляді графіка на рисунку 3.

Температура поліетилену на охолоджуючому барабані вимірювалась за допомогою інфрачервоного термометру, похибка якого не перевищує ±2ºС. Результати вимірювань температури показали, що температура на охолоджуючому барабані дорівнює 140ºС. Відповідно до встановленого значення температури, коефіцієнт тертя (згідно графіка рисунок 2) дорівнює 0,17. З урахуванням коефіцієнту тертя теоретична залежність зміни

ширини витягнутої плівки ($b$) від довжини зони витягування ($l$) буде мати вигляд, наведений на рисунку 3.

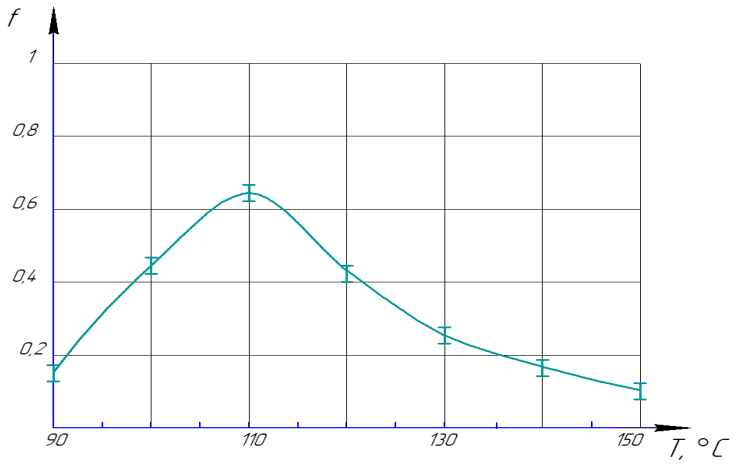



Рис. 2 Залежність статичного коефіцієнту тертя поліетиленової плівки марки 15802-020 по паперу при різних температурах поліетилену

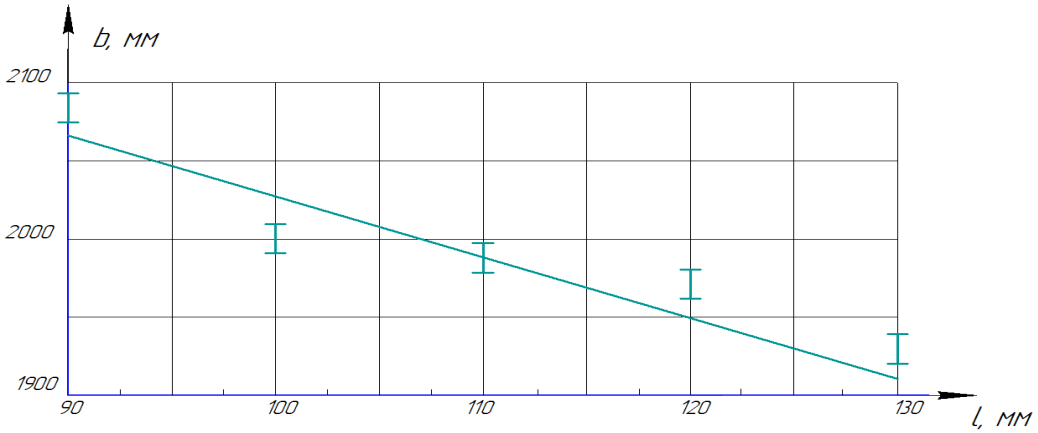



Рис. 3 Залежність ширини витягнутої плівки (b) від довжини зони витягування (l)

Як видно з графіка, похибка теоретичних значень ширини витягнутої плівки відносно експериментальних не перевищує 5%. Таким чином, теоретичне рівняння (8) добре описує експериментальні дані.

## Висновки

Визначені технологічні (швидкість на виході з головки і на охолоджуючому валку) та конструктивні (відстань від головки до охолоджуючого валка) параметри, які впливають на процес витягування полімерної плівки. Отримані рівняння залежності ширини плівки від початкової ширини плівки та коефіцієнта тертя. Проведені досліди та побудовано залежність коефіцієнта тертя від температури. Експериментально доведено адекватність теоретичних залежностей ширини плівки від відстані між охолоджуючим валком та головкою.

## Список література

1. *Шаповал В.М.* Механика эленгационного течения полимеров. – М.: Физматлит, 2007. – 176 с.

2. ГОСТ 10354-82. Пленка полиэтиленовая. Технические условия. -М.: Гос. Комитет СССР по стандартам, 1982. - 34 с.

УДК: 004.891:629.735

*В.М. Рудницький*
*(Черкаський державний технологічний університет, Україна),*
*О.О. Дядюшенко*
*(Академія пожежної безпеки ім. Героїв Чорнобиля МНС України, Україна)*

# ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОНІТОРИНГУ ПРИЧИН ТА НАСЛІДКІВ ПОЖЕЖ

*В доповіді піднімається наукова задача зменшення часу підготовки звітності та підвищення достовірності обробки і аналізу причин та наслідків пожеж шляхом знання орієнтованої підтримки прийняття рішень за рахунок розробки інформаційної технології моніторингу причин та наслідків пожеж.*

Перехід України до ринкових відносин, подальше розгортання державотворчих процесів, проведення соціально-економічних реформ, розширення міжнародного співробітництва, розвиток демократизації суспільства в Україні в умовах постійних зрушень у науково-технологічній сфері викликають різке зростання вимог до рівня інформатизації суспільства та інформаційно-аналітичного забезпечення органів державної влади та органів місцевого самоврядування. На сучасному етапі переходу від індустріального до інформаційного суспільства у всіх провідних державах світу ступінь використання інформаційного простору та інформаційних технологій стає безпосереднім чинником економічного зростання, забезпечення обороноздатності країни, соціально-політичної стабільності та розвитку демократичних засад в управлінні державою. У напрямку створення національних інформаційно–аналітичних систем різного призначення активно ведуться роботи в США, державах ЕС та Росії. Інтегрована інформаційно-аналітична система органів державної влади та органів місцевого самоврядування України має метою забезпечення оперативності, достовірності, доступності та конфіденційності інформації в органах державної влади, а також підвищення ефективності та досягнення якісно нового рівня прийняття рішень в системі управління державою. [1]

Метою роботи є розробка науково-технічних засад створення інтегрованої інформаційно-аналітичної системи для забезпечення умов прийняття обґрунтованих, узгоджених та ефективних рішень державним інспектором з пожежного нагляду щодо збору інформації про причини та наслідки пожеж, її обробки та документування.

Одним із основних завдань працівника органу ДПН є організація обліку пожеж та підготовка службової документації за її результатами.

Картка обліку пожежі складається з 8 розділів (90 пунктів), які державний інспектор повинен заповнити за результатами збирання відповідної інформації за фактом пожежі.

Серед показників якості інформаційних технологій для моніторингу причин та наслідків пожеж необхідно виділити наступні:

1. Час збирання та обробки інформації для підготовки рішення.
2. Кількість затрачених ресурсів для підготовки рішення.
3. Достовірність отриманої інформації.
4. Імовірність підготовки правильного проекту рішення тощо.

Серед вибраних показників для забезпечення автоматизації процесу підготовки проекту рішення найбільш доцільно використати час збирання інформації та достовірність її отримання.

Час збирання і обробки інформації для підготовки рішення ($T$) можна умовно розбити на 4 етапи, він буде складається:

$$T = \sum_{i=1}^{k} t_i^{\partial n} + \sum_{l=1}^{n} t_l^{nn} + \sum_{g=1}^{p} t_g^{nz} + \sum_{j=1}^{m} t_j^{nз} \qquad (1)$$

де k – кількість завдань інформацію про виконання яких інспектор ДПН фіксує до прибуття на місце пожежі, $t_i^{\partial n}$ – час виконання $i$-го завдання до прибуття на місце пожежі; $t_l^{nn}$ – час виконання $l$-го завдання під час гасіння пожежі; n – кількість завдань інформацію про виконання яких інспектор ДПН фіксує на місці пожежі під час її гасіння; p - кількість завдань інформацію про виконання яких інспектор ДПН фіксує при розслідуванні причин виникнення пожежі; $t_g^{nг}$ - час виконання $g$-го завдання при розслідуванні причин виникнення пожежі; m – кількість завдань інформація про виконання яких повинна поступити інспектору ДПН від служб та відомств, що можуть бути залучені до процесу розслідування пожеж; $t_j^{nз}$ - час виконання $j$-го завдання при оформленні документів про результати розслідування пожежі [2].

Процес заповнення звіту *(A)* виразимо у вигляді 4 подій:

$A = A^{\partial n} + A^{nn} + A^{nг} + A^{nз}$ - події несумісні.

Тоді ймовірність виникнення помилок при підготовці звіту буде представлена у вигляді

$$P(A) = P(A^{\partial n}) + P(A^{nn}) + P(A^{nг}) + P(A^{nз}) \quad (2)$$

Провівши розрахунок для кожної імовірності, отримаємо значення загальної імовірності виникнення помилки при оформленні звіту державним інспектором з пожежного нагляду:

$$P(A) = \sum_{i=1}^{k} P(A_i^{\partial n}) + \sum_{i=1}^{k} P(A_i^{nn}) + \sum_{i=1}^{k} P(A_i^{nг}) + \sum_{i=1}^{k} P(A_i^{nз}) \quad (3)$$

Достовірність інформації при виконанні кожного завдання може оцінюватися відсутністю помилок. Вона визначається наступним шляхом:

$$D = 1 - (\sum_{i=1}^{k} P(A_i^{\partial n}) + \sum_{i=1}^{k} P(A_i^{nn}) + \sum_{i=1}^{k} P(A_i^{nг}) + \sum_{i=1}^{k} P(A_i^{nз}) \quad (4)$$

Найбільш важливі показники які впливають на якість виконання завдань інспектором ДПН на етапах його роботи при збиранні інформації:

На I етапі час підготовки даних не є критичним, тому що він пов'язаний з часом прибуття на місце пожежі, проте важливе значення має достовірність фіксації часових проміжків та збору попередньої інформації.

На II етапі завдання пов’язані з фіксацією процесу гасіння пожежі. На даному етапі час підготовки даних також не є критичним.

На III етапі критичними є і час отримання і їх достовірність. Зменшення часу збору інформації дозволить інспектору ДПН швидше виконати поставлену задачу, покинути місце пожежі і перейти до виконання інших завдань згідно плану роботи.

На IV етапі критичними і час, тому що інформація надається різними службами та відомствами на основі власної діяльності.

Виходячи з аналізу етапів можна стверджувати, що для підвищення ефективності підготовки документації інспектору важливі наступні параметри $P^{\partial n}, P^{nn}, t_g^{nг}, P^{nг}, t_j^{nз}$.

Проблема швидкої ідентифікації причини пожеж обумовлює створення відповідного класифікатору. На основі аналізу статистичних даних щодо причин та наслідків пожеж за останні 5 років удосконалено метод побудови класифікатора надзвичайних ситуації щодо причин виникнення пожеж. Це дозволяє зменшити час ідентифікації причини пожежі за рахунок початку перевірки від найпоширенішої до менш поширеної причини.

Розроблений класифікатор може бути використаний у процесі побудови автоматизованого класифікатору на основі принципів ситуаційного управління.

Оскільки механізм формування рішення характеризується такими рисами як паралельність, асинхронність, недостатня формалізованість, то для моделювання цих процесів оптимальними виявились сітки Петрі. Але для створення адекватної моделі в формі

сіток Петрі треба обов'язково становити інтерпретацію елементів сіток Петрі щодо компонентів (факторів), що визначають надзвичайні ситуації (у тому числі пожежі), що буде визначати як позицію.

Оскільки класичні сітки Петрі є дводольним орієнтованим графом, будемо вважати, що кожна з позицій відображає одну з умов настання події. Сама ж подія визначається переходами сітки Петрі. При цьому наявність маркеру в позиції означає, що дана умова виконується. Одним з суттєвих недоліків класичної СП є миттєвість реалізації переходів, що в реальному житті неможливе. Виходячи з цього при синтезі сіткової моделі прийняття рішень інспектором доцільно пов'язати з кожним переходом час який потрібен для формування рішення.

Таким чином, для моделювання процесу формування рішення інспектором ДПН, що проводить дізнання будимо використовувати сітку Петрі наступного виду *ZP*: $Z \rightarrow P$, де $Z$ - множина усіх запланованих завдань, що надсилаються програмним забезпеченням, $P$ – кінцева непуста множина елементів (позицій) мережі *AT*, яка, в свою чергу, складається з ряду множин. Стан завдання $z_i \in Z$ має ознаку *Статус,* що визначає належність $z_i$ до $\Phi^n, \Phi^w$ чи $\Phi^r$. При чому $\Phi^n$ – завдання, які не видані, $\Phi^w$ – завдання, які виконуються і $\Phi^r$ – завдання, які буди здані, $\Phi^n \cap \Phi^w \cap \Phi^r = \varnothing$; Своєчасність видачі і здачі завдань характеризується ознакою *Своєчасність*, що визначає належність завдання $z_i$ до $\overline{W}$ чи $\widetilde{W}$, де $\overline{W}$ - множина виданих чи виконаних завдань без відхилення від плану, а $\widetilde{W}$ - множина завдань, час виконання чи видачі яких було затримано через вплив зовнішніх факторів на процес дізнання по пожежі, як об'єкт управління, причому $\overline{W} \cap \widetilde{W} = \varnothing$ й існує $ZW : Z \rightarrow (\overline{W} \cup \widetilde{W})$.

Множина подій, що є наслідком функціонування ПДБ, відображається елементами множини $E^a = \left\{E^{p\phi} \cup E^{\mathrm{d}}\right\}$ усіх подій, де $E^{p\phi}$ - події фактичного чи планового початку/завершення виконання завдання, при цьому $E^{p\phi} \rightarrow E$, $E^d$ - події перевірки стану завдання на початку проведення дізнання по кожній пожежі. Події з множини $E^a$ змінюють ознаки завдань у моменти часу з множини $T = \left\{T^p \cup T^f\right\}$, $T^p \cap T^f = \varnothing$, де $T^p$ - множина моментів часу перевірок на початку дізнання по кожній пожежі, що мали місце з початку заступання інспектора-дізнавача на чергування, $T^f$ - множина моментів часу перевірок на початку дізнання по кожній конкретній пожежі, що будуть мати місце до моменту закінчення чергування даного інспектора-дізнавача [3].

Перший етап методу здійснюється паралельно, асинхронно і циклічно в мережах моніторингу на початку проведення дізнання по кожній пожежі.

Другий етап методу, у випадку виникнення запізнення, дозволяє сформувати рішення, що представляють собою кінцеву множину, що можуть бути описані, у вигляді умов і відповідних способів вирішення, правилами бази знань.

Виходячи з вище сказаного, двоетапний метод виводу на знаннях для підтримки прийняття рішень з організації процесу дізнання по пожежам може бути представлений наступною послідовністю кроків:

Початкова ситуація задається наступним чином: $\forall z_i \in \Phi^n \wedge \forall z_i \in \overline{W}$, тобто для всіх завдань на початку чергування інспектора-дізнавача ознака *Статус* «не видане», ознака *Своєчасність* – «своєчасні».

Протягом чергування автоматизована система управління проведенням збору інформації по пожежі вносить до комп'ютерної системи моніторингу дані про введені і здані завдання, а система автоматично формує відповідні факти, що зберігаються у базі фактів поточних завдань. На початку збирання інформації по кожній пожежі проводиться перевірка внесеної інформації, її обробка.

Програма забезпечення мобільного автоматизованого робочого місця інспектора державного пожежного нагляду дозволяє замінити службову документацію, що готується для обліку пожеж за результатами пожежно-технічного розслідування за фактом пожежі на

місці події. Для цього необхідно заповнювати дані за допомогою спеціального програмного забезпечення, що встановлено і використовується на базі мобільного телефону в електронному вигляді і відправляти на стаціонарні комп'ютерні станції.

Розробка програми мобільного автоматизованого робочого місця інспектора державного пожежного нагляду може бути реалізована за допомогою програмного середовища NetBeans IDE 6.5.1 на платформі J2ME (Java 2 Micro Edition). Перевагами цього програмного середовища є можливість візуального режиму програмування.

Така модульна в побудові Java 2 ME дає необмежену можливість в модернізації всієї платформи і написанню дійсно апаратно-незалежного коду програми [4].

Фрагменти інтерфейсу розробленого програмного забезпечення у вигляді фотографій дисплею мобільного телефону представлені на рис. 1-2.

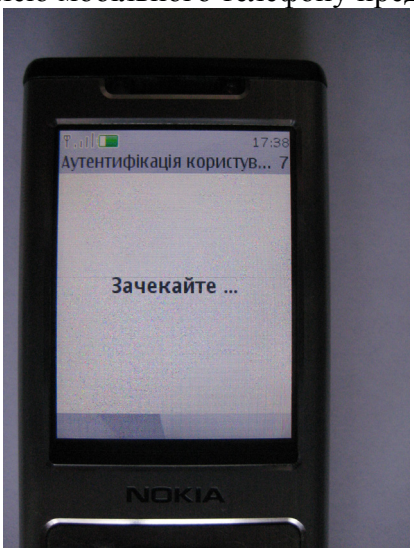



Рис.1. Аутентифікації користувача

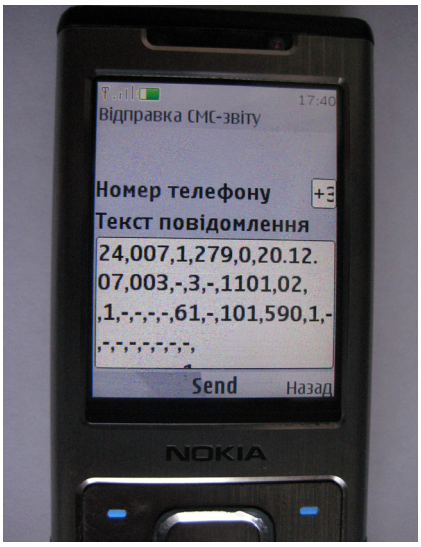



Рис. 2. Підготовка електронного СМС-звіту для відправки адресатам

За результатами практичного впровадження було встановлено, що розроблене програмне забезпечення автоматизованого робочого місця дозволило на 27 % зменшити витрату праці на підготовку картки обліку пожеж та на 12-15 % підвищити достовірність збору даних на всіх етапах пожежно-технічного розслідування за фактом пожежі.

## Висновки

1. Розроблено знянняорієнтований метод підтримки прийняття рішень у процесі збору інформації інспектором ДПН.
2. Вдосконалено метод для побудови класифікатору надзвичайних ситуацій та ймовірних причин виникнення пожеж.
3. Запропонована система підтримки прийняття рішень щодо моніторингу причин та наслідків пожеж, яка базується на спеціалізованих обчислювальних системах засобів мобільного зв'язку.

## Список літератури

1. *Рудницкий В.М., Бєсєдіна С.С.* Проблема забезпечення підтримки якісного функціонування урядової аналітично-інформаційної системи з питань надзвичайних ситуацій // Збірник наукових праць / ЦНДІ ЗС України - 2007. № 4 (34). – С. 154–159.

2. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: Высшая школа, 1997. – 479 с.

3. *Питерсон Дж.* Теория сетей Петри и моделирование систем. М.: Мир, 1984. – 264 с.

4. *Монахов В.В.* Язык программирования Java и среда NetBeans. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 640 с.

УДК 004.932.75:519.76

*М.І. Васюхін, О.О. Удовенко, Н.М. Лобанчикова*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# СПЕЦІАЛІЗОВАНА КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ЗАХИСТУ ТЕРИТОРІЇ АЕРОПОРТУ

*В статті запропоновано концептуальні положення побудови спеціалізованої комп'ютерної системи захисту території аеропорту*

Постійне зростання матеріальних витрат та заподіяння шкоди здоров'ю та життю людей, пов'язаних з наслідками актів незаконного втручання в діяльність авіації, зростання вимог щодо оперативності та обґрунтованості управлінських рішень щодо виявлення, попередження та ліквідації таких проявів з мінімізацією залученням ресурсів захисту, обумовлює необхідність розробки спеціалізованих комп'ютерних систем захисту території аеропорту для автоматизації процесів обробки інформації та прийняття управлінських рішень операторами служби безпеки аеропорту.

Складність та багаторівневої структури подібних систем вимагає використання системного підходу. Проведений аналіз та узагальнення робіт у сфері автоматизації процесу прийняття управлінських рішень [1-4] та сучасних підходів до інформатизації управління регіональною безпекою та створення складних спеціалізованих комп'ютерних систем [1,5,6], нормативно-правового забезпечення використання та роботи такого роду систем [7] створили передумови для створення спеціалізованих комп'ютерних систем захисту особливо важливих об'єктів та розроблення наукових основ їх побудови.

Метою даної роботи є концептуальне проектування спеціалізованої комп'ютерної системи захисту території аеропорту для автоматизації процесів обробки потоків вхідних даних операторів служб безпеки аеропортів та прийняття управлінських рішень щодо виявленої події та залучення ресурсів захисту для її ліквідації.

Авіаційна безпека забезпечується комплексом заходів, що передбачають створення і функціонування служб авіаційної безпеки, що забезпечують охорону аеропортів, повітряних суден та об'єктів цивільної авіації, огляд членів екіпажу, обслуговуючого персоналу, пасажирів, ручної поклажі, багажу, пошти, вантажів та бортових запасів, запобігають викраденню та захопленню повітряних суден. Робота служб безпеки аеропорту регламентується законодавчими нормативно-правовими актами України. Швидкий розвиток інформаційних технологій передбачає перегляд, як моделей та методів створення подібних систем, так і врегулювання законодавчого забезпечення для використання такого роду систем.

Спеціалізована комп'ютерна система захисту території аеропорту – це складна система, спрямована на підвищення ефективності роботи операторів служби безпеки аеропортів, підтримки прийняття рішень щодо запобігання і реагування на несанкціоновані (неадекватні) дії осіб, яка представляє собою сукупність математичних моделей і методів, інформаційних і програмно-технічних засобів, взаємопов'язаних і взаємодіючих із користувачами (працівниками служб безпеки) при підготовці, прийнятті і контролі виконання управлінських рішень щодо захисту населення, господарських і природних об'єктів території охорони від уражаючих впливів внутрішнього та зовнішнього походження. Складність та багаторівневої структури подібних систем вимагає використання системного підходу.

Цільова спрямованість системи включає: зовнішні цілі – підвищення швидкості прийняття управлінських рішень про залучення необхідних ресурсів для реагування та ліквідації проявів суб'єктів погроз; внутрішні цілі – підвищення оперативності збору та автоматизація процесів обробки, передачі даних та вироблення управлінських рішень; інтегровані цілі – підвищення ефективності відображення інформації при зборі інформації та контролі виконання управлінських рішень.

Системний підхід здійснюється за загальними (ефективності, комплексності, відкритості до розвитку, єдиного інформаційного середовища, модульності, уніфікації та стандартизації) і спеціальними принципами (випереджаючого реагування). Останній вимагає постійного контролю за усіма джерелами підвищеного ризику, завчасного прогнозування процесів їхнього прояву і оперативного відпрацювання адекватних контрзаходів для відведення чи мінімізації небажаних наслідків з оптимальним залученням ресурсів захисту.

Системний підхід до проектування спеціалізованої комп'ютерної системи захисту території аеропорту дозволили виділити наступні етапи системного проектування: концептуальний, функціональний, забезпечуючий, організаційний та загальносистемний.

На концептуальному рівні необхідним є розробка класифікації можливих НС на території аеропорту, яка включає визначення джерел небезпеки виникнення НС, об'єктів ураження, ресурсів при захисті території аеропорту; моделі прояву суб'єктів погроз на території аеропорту; моделі визначення рівня їх небезпеки; моделі виявлення та ліквідації їх проявів.

На функціональному рівні необхідним є створення моделей та методів для прогнозного управління та вироблення випереджаючих рішень.

Підвищені вимоги до зручності відображення інформації та просторово-часовий розподіл процесів виявлення та ліквідації проявів суб'єктів погроз передбачає реалізацію системи за принципом геоінформаціних технологій. Це дозволяє здійснювати оперативне обчислення і картографічну візуалізацію геометричних параметрів зони охорони, а також окремих ділянок території і об'єктів, що потрапляють у ці зони, в динаміці розвитку подій. Побудову організаційної частини доцільно здійснювати за принципом стереотипних ситуацій.

Виходячи з вище викладеного пропонується концепція побудови спеціалізованої комп'ютерної системи для захисту території аеропорту (рис.1), суттю якої є: визначення джерел небезпеки (*D*); визначення об'єктів ураження (*X*); визначення наявних ресурсів захисту (*R*); розробка заходів виявлення, виявлення суб'єктів погроз та попередження виникнення надзвичайних ситуацій на території аеропорту, розробка адекватних дій по їх ліквідації.

Спочатку проводиться всебічне обстеження заданої території та його оточення для виявлення джерел небезпеки $D_\nu$. Для кожного з них розробляються найбільш важкі сценарії можливих проявів уражаючих впливів. Відповідно визначаються потенційно небезпечні об'єкти ураження $X_\alpha$ і наявні ресурси захисту $R_\beta$. На наступному етапі будується модель прояву суб'єктів погроз.

Реалізація погроз виникнення надзвичайних ситуацій, що спричинені діями особистості, на території аеропорту можлива при доступі персоналу в службові приміщення та при регулюванні потоку пасажирів, рис.2.

Множину потоку пасажирів розділяємо на пасажирів ($Z_1$) (особи, що купили квиток, або його забронювали), відвідувачів аеропорту ($Z_2$) (особи, які цікавилися інформацією, проводжаючі, супроводжуючі), контактні особи ($Z_3$) (особи, що співпрацюють зі структурними підрозділами аеропорту, або фірмами, які проводять свою діяльність на території аеропорту).

Множину персоналу (N), який може бути задіяний в проведенні або підготовці актів незаконного втручання в діяльність авіації складають: працівники медико-біологічної служби ($N_1$); працівники служби авіаційної безпеки ($N_2$); працівники зі складу авіаційного персоналу ($N_3$); співробітники аеропорту ($N_4$).




Рис.1. Концепція безпеки аеропорту

Виходячи з рис.2. маємо відкрите класифікаційне угрупування суб'єктів погроз, яке представлене у вигляді об'єднання множин потенційних учасників (реалізаторів) погроз виникнення НС на території аеропорту:

$$P = N \cup Z = (\bigcup_{\gamma} N_{\gamma}) \cup (\bigcup_{j} Z_{j}) \qquad (1)$$

Таким чином визначено джерела небезпеки у вигляді множини суб'єктів погроз (P), які можуть реалізувати свої погрози через потік пасажирів (Z) або (та) персонал (N), які, в

свою чергу, можуть здійснити дії (впливи) на об’єкти ураження та спровокувати виникнення надзвичайної ситуації.

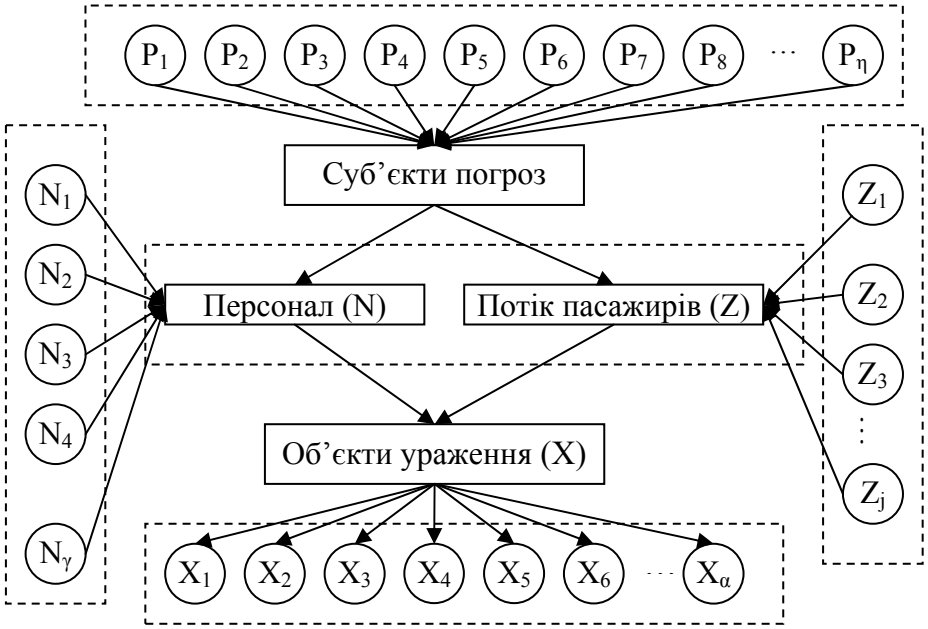



Рис.2. Модель прояву суб’єктів погроз виникнення надзвичайних ситуацій на території аеропорту

На наступному етапі формується потік вхідних змінних для аналізу та визначення рівня небезпеки суб’єктів погроз. Автоматизація обробки інформації відбувається шляхом аналізу вхідних змінних за допомогою логічних висловів продукційної моделі бази знань. Спеціалізована комп’ютерна системи проводить категоризацію суб’єктів погроз за принципом небезпечності. Завдяки цьому в автоматичному режимі визначається ранг надзвичайної ситуації та сповіщення відповідних служб безпеки.

## Висновки

В результаті проведеного дослідження було визначено необхідність розробки спеціалізованих комп’ютерних систем захисту аеропортів, визначено її задачі та структурні елементи, запропоновано початкові концептуальні положення побудови такого роду систем. Визначено джерела виникнення надзвичайних ситуацій, об’єкти ураження та ресурси при захисті, запропоновано модель прояву суб’єктів погроз.

## Список літератури


1. *Глушков В.М.* Введение в АСУ/ Глушков В.М.– К.: Техника, 1974. – 319 с.
2. *Роштейн О.П.* Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі.– Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 1999.–320 с.
3. Інтелектуальні системи: навч.посібник /[Ю.О. Колос, А.І. Бобунов, О.М. Перегуда та ін.]; під ред. Б.М. Герасимова.– Житомир:ЖВІ НАУ,2008.–176 с.
4. *Герасимов Б.М.* Системы поддержки принятия решений:проэктирование,применение, показатели эффективности /*Герасимов Б.М., Дивизинюк М.М., Субач И.И.*.– К:Знання, 2004 – 324 с.
5. *Биченок М.М.* Основи інформатизації управління регіональною безпекою. – К.Інститут національної безпеки, 2005. – 196 с.
6. *Нікітін А.В.* Філосовсько-правовий аналіз девіантної повіденки особистості: автореф.дис. на здобуття наук. ступеня канд. юрид.наук: спец. 12.00.12 «Філософія права»/ А.В.Нікітін.– Київ, 2004. – 17 [1] с.
7. *Мелкумян В.Г.*, Технологічні системи обслуговуючого типу. Елементи теорії проектування і прикладні задачі експлуатації: Монографія .– К.НАУ,2002.–171 с.

УДК 004.932.75

*М.И. Васюхин, д.т.н., профессор,*
*С.М. Креденцар, аспирант*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СЦЕНЫ В АЭРОНАВИГАЦИОННЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

*В работе предложена методика построения динамической сцены в аэронавигационных геоинформационных системах реального времени. Предложен комплекс методов, обеспечивающий построение статической и динамической составляющих текущей воздушной обстановки, отображаемой АНГС РВ в реальном времени.*

В настоящее время для отображения процессов перемещения движущихся объектов в околоземном пространстве широкое применение получили так называемые интерактивные геоинформационные комплексы реального времени, которые составляют особый класс автоматизированных систем реального времени. Их называют оперативными системами наблюдения, интерактивными видеотерминальными комплексами, системами интерактивной машинной графики и т.п. В современной авиации функции таких комплексов выполняют аэронавигационные геоинформационные системы реального времени (АНГС РВ).

АНГС РВ предназначены для оперативного наблюдения, отображения и анализа текущей воздушной динамической обстановки. Характерными задачами таких комплексов являются задачи наблюдения за движением объектов в околоземном пространстве, отображения процессов их перемещения на экранах и др. Основная задача средств отображения в таких системах состоит в том, чтобы с помощью всей имеющейся информации дать оператору сведения для лучшего понимания обстановки, представленной в виде электронного кино в реальном времени.

Функция оператора АНГС РВ заключается в анализе обстановки, представленной изображениями и принятии своевременных адекватных решений. Поскольку АНГС РВ является человеко-машинной системой, в которой оператор принимает основные управленческие решения, следовательно скорость оценки воздушной обстановки и правильность принятия адекватного решения в значительной степени зависит от выбора формы представления информации. Поэтому в таких системах остро ставиться вопрос о формировании динамических изображений в реальном времени в интерактивном режиме, когда траектории перемещения объектов заданы заранее или определяются действиями пользователя.

В существующих системах отображения воздушной обстановки перемещение реальных объектов представляется в виде элементарных символов объектов (точек или крестиков), перемещающихся на фоне некоторого плана-схемы, отображающего лишь границы областей наблюдения (территорий аэропортов, городов и т.д.). Подобное представление информации является не достаточным, поскольку не дает точного и наглядного представления ситуации, что осложняет работу оператора и принятие ним адекватного решения. Для комфортного восприятия и однозначного распознавания символов необходимо, чтобы их изображения на экране были представлены всеми необходимыми атрибутами, свойственными прикладной задаче, перемещались и поворачивались плавно, без задержки и резких скачков. Поэтому возникла задача создания методики построения динамической сцены, которая позволяет отображать динамическую обстановку в виде электронного кино в реальном времени и включают отображение перемещения наблюдаемых объектов и ситуации вокруг них (в виде географически организованной информации с послойной пространственной привязкой с наложением на нее в необходимом масштабе графически-осмысленных сложных символов реальных объектов).

Для решения данной задачи предложено для обеспечения большей информативности и увеличения скорости отображения зрительного образа динамическую сцену текущей обстановки представлять в виде двух составляющих [1]: статической, которая представляет собой цифровую карту местности с большим количеством географических объектов и детализацией атрибутов, описывающих их графическое и информационное представление, и динамической, описывающей перемещение реальных объектов.

Таким образом, динамическая сцена текущей обстановки в АНГС РВ складывается из двух составляющих: статической (картографический фон) и динамической (перемещение сложных символов реальных объектов), рис. 1.




Рис. 1. Общее представление составляющих динамической сцены

Для решения задачи построения динамической сцены В АНГС РВ в общем случае необходимо выполнить следующие шаги:

1. Отобразить карту местности в заданном масштабе на экране АНГС РВ.
2. Обеспечить вывод с приоритетом на ее фоне по заданным координатам изображение движущихся символов сложной формы.
3. Обеспечить отображение перемещения (линейное перемещение и вращение) сложных символов объектов на картографическом фоне в реальном времени.

На первом этапе предлагается осуществить преобразование электронной карты данной местности в векторный формат и выполнить алгоритм визуализации картографического фона в этом формате.

Для выполнения второго этапа предлагается изображение символа самолета записать в векторном или матричном виде в зависимости от требований процесса эффективного распознавания оператором этих символов. Определить местоположение реальных объектов и по координатам отобразить сложные символы объектов на картографический фон.

Третий же этап подразумевает отображение перемещений символов объектов, для чего движения символов задаются конформными преобразованиями (т.е. представимыми в виде композиции параллельных переносов и поворотов [2]), высчитываются возможные по ходу траектории повороты и параллельные переносы, выполняется постоянный перерасчет координат символов объектов и их отображение на экран.

Предлагается в основу построения динамической сцены положить, модель процесса построения динамической сцены в АНГС РВ [3], состоящую из двух моделей: модели процесса построения картографического фона, включающую тематическую модель картографических данных, графическую модель картографических данных, пространственную модель картографических данных, характеристики инфологической модели картографической базы данных, совокупность картографических связей между тематическими, пространственными и графическими данными, атрибуты картографических

связей, наборы интегральных характеристик картографических связей и их атрибутов, отображения задающие характеристики инфологической модели, отображения определяющие взаимосвязи между картографическими связями, их атрибутами и конкретными наборами интегральных характеристик, и отображение определяющие соотношение между классами объектов, вовлекаемых в картографические связи; и модели процесса представления движущихся объектов, которая представляет движущийся объект в виде геометрического и классификационного описания.

Основой для построения статической составляющей динамической сцены является база картографических данных (БКД) [4], для построения которой предлагается применить взаимосвязанные метод построения БКД АНГС РВ, основанный на введении в иерархическую структуру стандартной БКД дополнительного уровня, реализующего технологию внешнего хранения информации в виде отдельной электронной карты, что обеспечивает доступ к картографическим данным за меньшее время, и метод построения картографического фона, который при первичном построении фона выбирает данные из БКД с одновременным сохранением его в отдельном внешнем файле, а при последующих обращениях выбирает данные из этого файла, за счет чего сокращается время построения картографического фона для отдельных задач в 2 раза.

Для реализации динамической составляющей динамической сцены предлагается ряд методов организации динамических перемещений, к которым можно отнести: метод базовых матриц; метод перемещения, ориентации и отображения на экране символа при его движении по заданному маршруту; метод реперных точек, а также модифицированный метод базовых матриц поворота сложного символа [5], основанный на использовании БД символов, которая хранит все возможные азимутные изображения символа объекта, в результате чего поворот символа выполняется за время равное времени развертки кадра.

Зачастую при построении зрительного образа динамической сцены в АНГС РВ решающую роль играет метод отображения перемещений символов. Часто возникают ситуации, когда одного метода для отображения перемещений символа недостаточно и гораздо рациональнее было бы использовать для различных случаев различные методы, отличающиеся по скорости осуществления эволюций, по типу используемой памяти и т.д или их сочетания. Поэтому также предложена методика выбора оптимального состава методов обеспечивающая построение зрительного образа динамической обстановки на экранах АНГС РВ, которая определяет оптимальный процент использования из $m$ программных средств, имеющихся в комплексе, $n$ методов обеспечивающих, построение зрительного образа [6], оптимизируя при этом скорость его отображения.

Для отображения на экран зрительного образа динамической обстановки применить канала вывода информации, структура которого основывается на 2 параллельных ветвях обработки данных: одна обеспечивает построение и отображение на экране статической составляющей зрительного образа динамической сцены; вторая - построение динамической составляющей зрительного образа динамической сцены, что обеспечивает в момент изменения дисплейного файла перекомпиляцию не всего дисплейного файла, а лишь только его сегмента, что, в свою очередь, обеспечивает увеличение скорости построения кадров зрительного образа при воспроизведении его на экране в реальном времени.

## Выводы

Интеграция и комбинация этих методов позволяет создать динамическую сцену представления воздушной обстановки, отображаемой в реальном времени на экране АНГС РВ в соответствии с выдвигаемыми требованиями по скорости и реалистичности отображения.

## Список литературы:


1. *Васюхин М.И.* Методы организации динамических сцен в геоинформационных комплексах оперативного управления / *М.И. Васюхин, О.И. Капштык, А.М. Касим, С.М. Креденцар* // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2007. – № 27. – С. 72-76.

2. *Смолий В.В.* Методы и средства синтеза и отображения динамических объектов (для центров оперативного управления): дис. … кандидата техн. наук: 05.13.13 / *Смолий Виктор Викторович*. – К., 2001. – 176с.

3. *Васюхин М.И.* Модель процесса построения динамической сцены в аэронавигационных геоинформационных системах реального времени / *М.И. Васюхин, В.Д. Гулевец, С.М. Креденцар* // Сборник научных трудов Донецкого государственного технического университета. – 2008. – № 9(132). – С. 119-125.

4. *Васюхин М.И.* Модульно-иерархическая структура базы картографических данных и метод быстрого построения картографического фона на экране аэронавигационной геоинформационной системы реального времени / *М.И. Васюхин, С.М. Креденцар* // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2009. – № 1(34). – С. 218-224.

5. *Васюхин М.И.* Метод ускоренного поворота сложного символа при построении динамической зрительной сцены в аэронавигационных геоинформационных системах реального времени / *М.И. Васюхин, О.И. Капштык, С.М. Креденцар* // Вестник Херсонского национального технического университета. – 2008. – № 30. – С. 281-287/

6. *В.А. Бородін* Методика вибору оптимального складу методів побудови зорового образу динамічної обстановки / *В.А. Бородін, С.М. Креденцар* // Вісник НАУ. – 2009. – № 2. – С. 123-128.

УДК 005.311.2:004.94

*П.М. Павленко, д.т.н., заст. дир. з наук.-метод. роботи ІІДС,*
*Ю.В. Задонцев, нач. управління маркетингу та технічного розвитку,*
*А.О. Хлевний, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ПРОЕКТАМИ В ІНФОРМАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ УНІВЕРСАЛЬНОЇ PDM-СИСТЕМИ

*В доповіді представлені результати використання науково-дослідних робіт по автоматизації процесу управління проектами в ході технічної підготовки машинобудівного підприємства.*

В ході сучасної технічної підготовки промислового виробництва кожен новий виріб супроводжується конструкторськими проектами (КПр), такими як: 3D моделі виробу, 3D моделі оснастки, 3D моделей технологічного обладнання та інші. Розробку маршрутних та операційних процесів й інших технологічних документів відносять до технологічних проектів (ТПр). Тобто, існує певна категорія робіт і відповідних документів, які відповідають поняттю «проект», та які сучасні інженери використовують в електронному вигляді і потребують функції управління та ії автоматизації.

В доповіді автори представляють результати виконаних науково-дослідних робіт по автоматизації процесу управління конструкторсько-технологічними проектами в інтегрованому середовищі універсальної PDM-системи ENOVIA SmarTeam v5.

Сучасні спеціалізовані комп'ютерні системи виробничого призначення, такі як CAD/CAM/CAE - системи; ERP-системи та інші, використовуючи вище вказану проектну документацію і дані, не мають засобів автоматизованого управління названими проектами. Сучасні універсальні PDM-системи мають інструментальні засоби такої автоматизації, але для їх використання потрібно розробити відповідні програмні засоби.

Розглянемо реалізацію автоматизованого управління в інтегрованому інформаційному середовищі (ІІС) PDM-системи ENOVIA SmarTeam v5.

Управління конструкторськими проектами. КПр описується своєю конструкторською документацією, до якої належать моделі, креслення й текстові документи. При цьому, якщо створення моделей і креслень є прерогативою CAD-систем, то формування текстових документів найдоцільніше виконувати в середовищі PDM-системи. Це обумовлено, з одного боку, тим, що в PDM міститься необхідний для їх генерації повний опис структури та змісту проекту, а з іншого боку тим, що ці документи мають бути частиною ІІС.

Необхідною умовою управління КПр в ІІС є інтеграція використовуваних CAD-систем з PDM-системою. Така інтеграція має включати:

1. Прив'язку до КПр імені використовуваної CAD-системи з метою її виклику з PDM-системи під час роботи з 3D-моделлю чи кресленням виробу.
2. Прив'язку згенерованого CAD-системою файла з 3D-моделлю чи кресленням до відповідного об'єкта класів «Проект виробу», «Складальна одиниця», «Деталь» та ін.
3. Передавання атрибутної інформації про об'єкт з PDM у CAD-систему і навпаки.

Перший і другий елементи інтеграції забезпечуються управлінням атрибутів «Ім'я CAD-системи» в набір атрибутів класу «Проект виробу» та атрибуту «Ім'я файла» – у набори атрибутів відповідних класів. Третій елемент інтеграції потребує наявності у PDM і CAD-системах спеціальних інтерфейсів. Наприклад, PDM-система ENOVIA SmarTeam має інтерфейсні модулі інтеграції з CAD-системами CATIA, Pro/Engineer, SolidWorks, SolidEdge, Cimatron E та ін.

PDM-система ENOVIA SmarTeam взаємодіє з інтегрованими з нею CAD-системами за допомогою виконання таких функцій:

– автоматичний виклик CAD-системи із ENOVIA SmarTeam із передаванням файла для проектування 3D-моделі для використання її в складанні чи для створення креслення;

– автоматичне передавання інформації з ENOVIA SmarTeam в основний напис креслення, яке проектується в CAD-системі;

– автоматичний виклик ENOVIA SmarTeam із CAD-системи для передавання файлів 3D-моделей з реєстрацією 3D-моделей, якщо вони первинно створені в CAD-системі (тобто передавання в ENOVIA SmarTeam дерева складання);

– автоматичне передавання інформації з основного напису креслення, створеного в CAD-системі, в ENOVIA SmarTeam.

Первинне створення проекту виробу, як і формування текстових конструкторських документів, доцільно виконувати в PDM-системі: при цьому вводять загальні атрибути проекту (позначення, найменування, дата початку розробки й т. ін.), і проект стає елементом бази даних. На рис. 1 наведено фрагмент процесу управління проектом в інформаційному середовищі PDM-системи ENOVIA SmarTeam.

Після закінчення управління здійснюється передавання цих даних у CAD-систему, в якій виконується процес створення 3D-моделей і креслень виробу.

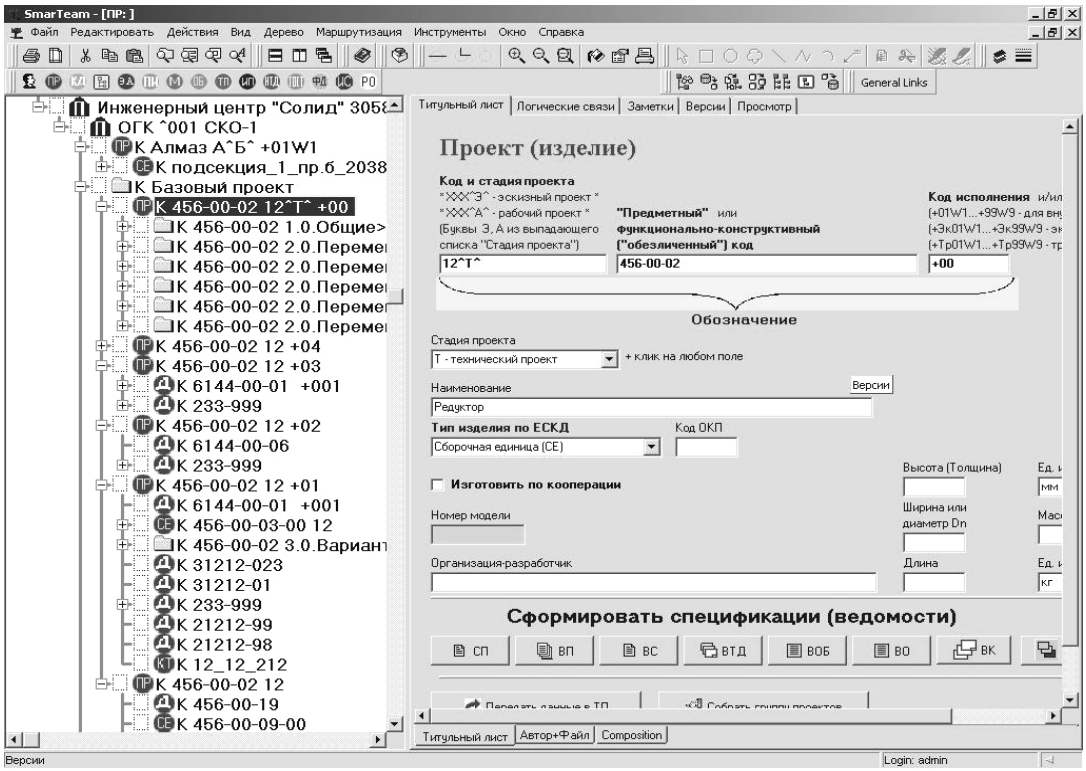



Рис. 1 − Фрагмент процесу управління проектом

Після завершення дані про склад і структуру виробу передаються в PDM-систему, що приймає їх і перетворює відповідно до структури бази даних ІІС (рис. 2).

Зазначимо, що дане перетворення структури проекту (як і формування текстових конструкторських документів) не є «штатною» функцією PDM-системи, а реалізується за допомогою спеціально розробленого додатка PDM системи засобами API.

Управління технологічними проектами. Процес управління ТПр, як і процес управління КПр, тісно пов’язаний з методами, які використовуються для автоматизації рішення проектних процедур. Якщо для КПр такі методи визначаються обраною CAD-системою, то для ТПр вони залежать від можливостей використовуваної системи автоматизованого проектування технологічних процесів (САПР ТП), яка розв’язує задачі побудови технологічного процесу механообробки, зварювання, складання та ін.

Пропонується принципово нове рішення, яке полягає в розробці САПР ТП у середовищі універсальної PDM-системи. Це автоматично забезпечить інтеграцію результатів проектування в ІІС технологічної підготовки виробництва, тому що всі елементи проектованого

технологічного процесу розміщуються безпосередньо в ІІС відповідно до прийнятої класифікації об’єктів технологічної підготовки виробництва [1].

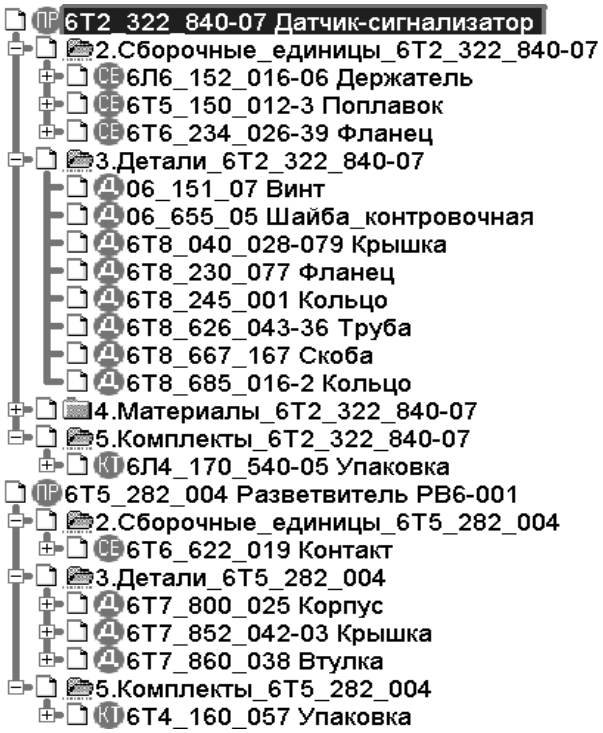



Рис. 2 − Структура дерева проекту в PDM-системі ENOVIA SmarTeam

Проектування технологічного процесу (як проектування «з нуля», так і проектування на основі технологічного процесу-аналога) виконується як стандартний процес побудови дерева проекту (рис. 3). Можна додавати, вилучати чи замінювати вузли дерева, описувати їхні конкретні характеристики. При цьому визначають послідовність операцій у маршрутному технологічному процесі, послідовності переходів в операційних технологічних процесах, вибирають обладнання, оснастку та інструмент, указують режими обробки.

Усі ці дії виконуються з використанням відповідних розділів бази даних. Наприклад, додаючи в дерево технологічного процесу нову операцію, технолог вибирає найменування операції з запропонованого системою списку. Вибираючи, наприклад, різальний інструмент для переходу «Точити поверхню», технолог переглядає списки наявних різців тощо.

Засоби налагодження системи дають змогу реалізувати так званий спрямований пошук інформації. Цей пошук використовують за автоматичного формування списків даних, що пропонуються технологу під час вирішення завдань вибору обладнання, оснастки, технологічних переходів та інших елементів технологічного процесу. Спрямований пошук дозволяє одержувати такі списки, що «не містять нічого зайвого». Так, під час вибору обладнання в токарній операції пропонується тільки список токарних верстатів (не фрезерних і не електроерозійних), під час вибору чергового переходу в токарній операції пропонуються тільки можливі для даної операції переходи і т. д. Користувач може сам легко зв’язувати певні групи об’єктів для забезпечення спрямованого пошуку.

Отриманий в ході такого автоматизованого проектування технологічний процес формується у вигляді інформаційної моделі. Завдяки реалізованому в PDM об’єктно-орієнтованому підходу інформаційна модель технологічного процесу не містить безпосередньо тих даних, які були «взяті» з бази під час проектування технологічного процесу (наприклад, найменування операцій і переходів, дані про різальний інструмент, нормативно-довідкова інформація). Вона містить тільки посилання – спеціальні покажчики на місце розташування цих даних. Це дає змогу виключити непотрібне дублювання інформації.

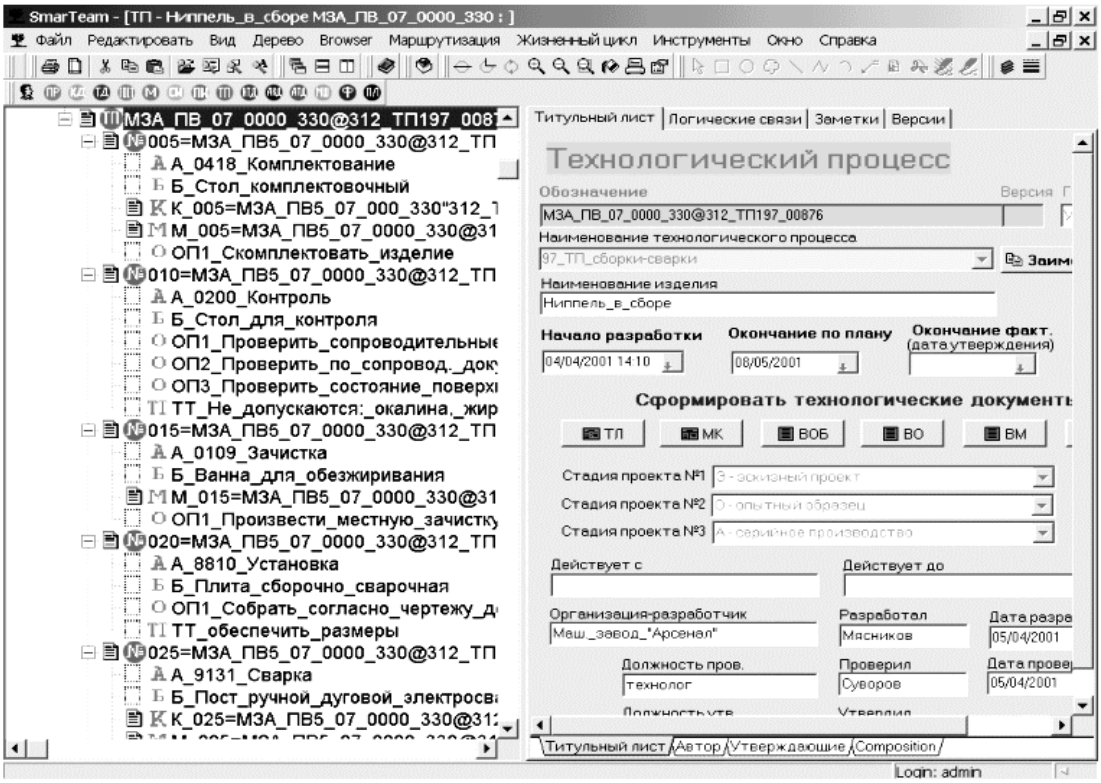



Рис. 3 − Фрагмент проектування технологічного процесу в PDM-системі ENOVIA SmarTeam

Будь-яка зміна елементу бази даних (наприклад, найменування пристрою чи інструкції з техніки безпеки) призводить до того, що ця інформація автоматично «замінюється» в усіх розроблених технологічних процесах, тому автоматично забезпечується відповідність інформації, яка міститься в технологічному процесі, та інформації різних розділів бази даних.

Після завершення проектування технологічного процесу виконується його нормування і технологічний процес надходить на затвердження. Комплект технологічних документів розміщується в класі «Технологічна документація». За запитом користувача комплект технологічних документів чи окремі документи можна роздрукувати.

## Висновки

Представлені інструментальні засоби автоматизованого управління конструкторсько-технологічною інформацією розроблені в інтегрованому інформаційному середовищі PDM системи ENOVIA SmarTeam. Їх впровадження на ряді машинобудівних підприємств України підтвердило їх відповідність сучасним потребам фахівців і забезпечило скорочення часу на проектування і роботу, як з конструкторською, так і технологічною документацією [2].

## Список літератури

*1. Павленко П.М.* Автоматизовані системи технологічної підготовки розширених виробництв. Методи побудови та управління. Монографія. – К: Книжкове видавництво НАУ, 2005. – 280 с.

*2. Павленко П.Н., Трейтяк В.В., Кудряков В.Ю.* Опыт разработки и внедрения автоматизированной системы технической подготовки производства // Вестник двигателестроения. – 2007. - №2. – С. 117-119.

УДК 658.011.56.012:004.94

*В.А. Толбатов, к.т.н.,*
*А.В. Толбатов*
*(Сумской государственный университет, Украина)*

# ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ ВНЕДРЕНИЯ PDM СИСТЕМ

*В работе рассматриваются преимущества PDM системы и этапы ее внедрения на предприятиях. Предложена методика оценки эффективности внедрения PDM технологий для каждого этапа жизненного цикла изделий*

Современный рынок требует очень четкого и быстрого реагирования на потребности заказчика и возможности субподрядчиков при одновременном ограничении затрат. Сложность внедрения PDM вызвана тем, что задействуются практически все основные подразделения предприятия, на некоторые из них возлагаются новые функции. Электронное управление данными изделия предполагает возникновение новых типов документов - электронных моделей деталей и сборок. Создаваемые для технологической подготовки производства 3D-модели являются "подручным материалом", а не документами.

Преимущества для предприятия от PDM систем. Внедрение PDM позволяет изменить методологию конструкторско-технологической подготовки производства, организовать процесс подготовки производства в разрезе ведения конструкторско-технологической информации об изделии (составы, техпроцессы изготовления, технологические маршруты, материалы, трудоемкость изготовления), а не как процесс выпуска и сопровождения документооборота.

Система является общим структурированным хранилищем информации, которое позволяет систематизировать, упорядочить, проработать и уточнить взаимосвязанную информацию об изделиях, служит средой коллективной работы специалистов различных служб, объединенных общим бизнес-процессом.

Процессы подготовки производства и проведения изменений эффективно контролируются получением сводной информации в различных разрезах с учетом всех связанных факторов. Работа служб и отдельных специалистов становится более скоординированной. Уменьшается вероятность выполнения неактуальных работ, появления противоречащих друг другу извещений на изменение [1].

PDM позволяет управлять электронной структурой изделия, файловым архивом конструкторской и технологической документации, вести учет подлинников и копий бумажного архива, рассчитывать трудовые и материальные нормы, оперировать электронными извещениями об изменении, разграничением прав доступа к конструкторской и технологической информации.

Связь каждого элемента PDM-системы с номенклатурой обеспечивает получение информации о виде воспроизводства данной комплектующей, основных ее поставщиках, аналогах, наличию на складе и т.п., позволяя формировать оперативные управленческие решения, основываясь на достоверности данных внутри ERP-системы, с одной, и PDM-системы, с другой стороны.

Система обеспечивает:

- управление составом проектируемых изделий;
- совместную работу всех пользователей с проектной информацией;
- защиту данных и специализацию пользователей и групп, определяемую правами доступа к информации;
- управление электронным архивом документов по конструкторско-технологической подготовке производства, включая операции заимствования состава;
- многовариантное проектирование;
- хранение вариантов, не вошедших в основной проект;
- поиск узлов и деталей по различным проектам;

- поиск документов;
- полуавтоматическую нумерацию (обозначение) узлов, деталей и документов;
- возможность просматривать документы, чертежи и трехмерные модели различных графических форматов;
- контроль уникальности обозначений изделий (документов);
- возможность проверки комплектности выпущенной документации;
- контроль номенклатуры применяемых материалов и сортамента;
- работу со справочником номенклатуры;
- контроль сроков выпуска рабочей документации;
- учет поступления рабочей документации в архив;
- формирование на любой стадии проекта различных отчетов по результатам проектирования;
- формирование спецификации и различных ведомостей;
- запуск приложений для редактирования документов прямо из системы;
- ведение технологических маршрутов;
- возможность задания различных материальных и трудовых норм в зависимости от технологических маршрутов на изделие;
- учет основного и вспомогательного материалов и оснастки;
- учет полуфабрикатов в точках технологических маршрутов;
- обработку сборочных единиц, не подлежащих учету при планировании.

Выгоды от использования PDM систем. Основной выгодой от использования на предприятии PDM является сокращение времени разработки изделия, т.е. сокращение времени выхода изделия на рынок и повышение качества изделия. Сокращение времени выхода на рынок достигается в первую очередь за счет повышения эффективности процесса проектирования изделия: избавление конструктора от непроизводительных затрат своего времени, связанных с поиском, копированием и архивированием данных, что составляет 25-30% его времени; улучшение взаимодействия между конструкторами, технологами и другими участниками ЖЦ изделия за счет поддержки методики параллельного проектирования, что приводит к сокращению количества изменений изделия; значительное сокращение срока проведения изменения конструкции изделия или технологии его производства за счет улучшения контроля за потоком работ в проекте; резкое увеличение доли заимствованных или слегка измененных компонентов в изделии (до 80%) за счет предоставления возможности поиска компонента с необходимыми характеристиками [1].

Рассмотрим основные этапы внедрения PDM системы. Современный рынок требует очень четкого и быстрого реагирования на потребности заказчика и возможности субподрядчиков при одновременном ограничении затрат. Сложность внедрения PDM вызвана тем, что задействуются практически все основные подразделения предприятия, на некоторые из них возлагаются новые функции. Электронное управление данными изделия предполагает возникновение новых типов документов - электронных моделей деталей и сборок. Создаваемые для технологической подготовки производства 3D-модели являются "подручным материалом", а не документами.

Наиболее оправданной является реализация четырех этапов. Продолжительность первого около года, последующие этапы подробно не определены, но для них установлены основные задачи и ориентировочная продолжительность.

К задачам первого этапа относятся: ввод в систему всей информации по выбранному изделию; наполнение данными информационного пространства (банк знаний); обеспечение корректности моделей, созданных в системах САПР; реализация структуры хранения данных и учет документов на бумажных носителях; ознакомление сотрудников с системой; реализация маршрутной технологии; создание технологических процессов в интегрированной среде; интеграция с системой подготовки технологических процессов; настройка в системе бизнес-процессов первой очереди; разработка методики,

обеспечивающей одновременный электронный и бумажный документооборот; разработка механизма внесения изменений и их отслеживание; разработка программы загрузки данных из системы АСУ предприятия.

Основные задачи второго этапа - реализация в электронном виде бизнес-процессов утверждения и согласования электронной документации и подключение к системе ряда цехов основного производства.

На третьем этапе предусматривается интеграция с системой ERP и системой организационного документооборота, а также расширение области применения PDM на все изделия основного производства. В ходе четвертого этапа будут производиться внедрение электронной цифровой подписи в соответствии с действующим законодательством, создание единого информационного пространства с разработчиком и эксплуатацией.

Кроме того реализуется подготовительный или, другими словами, предпроектный этап. Основными задачами этого этапа являются создание необходимых организационных предпосылок, формирование структурного подхода, разработка ряда документов, необходимых для дальнейшего внедрения системы [2].

Несколько подробнее остановимся на мероприятиях и особенностях первого этапа. На этом этапе планируется развернуть дополнительные пользовательские рабочие места и необходимую серверную составляющую. Безусловно, перевести абсолютно всю существующую на бумаге информацию по изделию в электронный вид в сжатые сроки невозможно, решение этой задачи может затянуться на годы. Поэтому были сформулированы следующие принципы ввода информации:

- электронный состав изделия находится в системе в полном объеме и соответствует бумажным спецификациям;
- информация, относящаяся к объектам, вносится только по тем узлам, по которым ведутся работы или проводятся изменения (сканируются чертежи, вносятся определенные реквизиты, добавляются файлы, необходимые для работы с данным объектом);
- создание трехмерных моделей осуществляется только для сложных узлов изделия или по заказу подразделений предприятия;
- разработка извещений осуществляется в электронном виде;
- в согласовании участвуют твердые копии документов;
- после согласования им присваивается соответствующий статус в системе;
- при обработке базы данных, наполненной информацией из отдела АСУ, в карточке детали/сборочной единицы просто фиксируется номер последнего извещения, на основе которого создана данная версия объекта;
- для обеспечения достоверности и синхронизации данных вся информация проходит этап проверки, после которого электронным документам присваивается специальный статус.

Следование этим принципам позволит запустить в электронном виде основные бизнес-процессы подготовки производства без кардинальной ломки сложившихся функций подразделений и изменения их взаимоотношений. Наполнение информацией будет происходить постепенно по мере необходимости, при этом электронный состав изделия будет играть роль основы, к которой будет присоединяться как графическая информация в виде 3D-моделей и электронных чертежей, так и текстовая в виде всевозможных атрибутов.

Важным аспектом коллективной работы является система согласования и утверждения документации. Основным документом, управляющим другими, как и в существующей системе, будет извещение. До внедрения электронно-цифровой подписи, извещения будут создаваться в электронном виде, а согласовываться в классическом бумажном виде.

Как правило, основным препятствием на пути внедрения новых технологий организации работ, в том числе и PDM, является психологическая неготовность участников. В результате внедрения системы PDM руководство предприятия рассчитывает не только усовершенствовать работу конструкторско-технологических служб, но и получить ряд принципиально новых возможностей. Глобальной целью таких проектов является оптимизация управления инженерными данными, повышение качества выпускаемых

изделий, сокращение сроков разработки и подготовки производства, комплексная поддержка жизненного цикла изделия [1].

Эффективность внедрения PDM систем. В настоящее время для определения эффективности инвестиций предлагается ряд методик, которые можно группировать следующим образом: традиционные финансовые методики; вероятностные методы; инструменты качественного анализа. Традиционно экономический эффект от мероприятий по совершенствованию сферы проектирования и подготовки производства выражается в ускорении подготовки производства и снижении затрат на ее осуществление.

Проиллюстрировать ситуацию можно на примере внедрения PDM-систем в сфере проектирования и подготовки производства машиностроительных предприятий.

Для оценки эффекта, полученного от использования PDM-системы, необходимо сопоставить общие издержки традиционного бумажного документооборота с суммарными затратами на организацию и поддержку электронного документооборота. По мнению экспертов, наибольший эффект от использования PDM-системы лежит в двух областях: сокращение времени выхода изделия на рынок и повышение качества изделия.

Необходимо учитывать, что, рассчитывая эффект от внедрения PDM-системы, мы определяем эффективность внедрения не только самой системы PDM, но и новых принципов работы. Первое предполагает автоматизацию или механизацию, что приводит к экономии ресурсов, а второе - организационную инновацию.

В связи с этим методика оценки эффективности внедрения PDM-технологий должна иметь комплексный характер по отношению к выбору источников эффективности: помимо экономии традиционно выделяемых производственных ресурсов предприятия (сырье, энергия, труд и др.), необходимо оценивать влияние новой организации работы на такие показатели предприятия, как качество продукции, новые методы обслуживания клиентов, и в конечном счете конкурентоспособность и общая капитализация предприятия, что в комплексе достаточно трудно оценить единым количественным показателем. Поэтому комплексный характер методики должен проявляться и при выборе показателей для оценки изменений. Предпочтительно комбинированное использование качественных и количественных показателей [2].

## Выводы

Основной методологический подход к оценке эффективности внедрения PDM-технологии заключается статистической оценке результатов выполнения однородных процессов до и после внедрения системы или ее соответствующего этапа. При этом важное значение имеет выделение рассматриваемого процесса, учет его влияния на общие результаты предприятия, формирование однородной выборки исходных данных. Для каждого этапа ЖЦИ требуется определить свои показатели эффективности. Современные системы PDM состоят из следующих модулей: хранилище объектов и средства управления документооборотом; средства управления структурой изделия; средства поддержки классификаторов и справочников; средства просмотра и аннотирования документов и моделей различных форматов; средства управления проектом и проведением изменений; средства поиска информации; средства управления проектом; интерфейсы к прикладным пакетам; коммуникационные интерфейсы и интерфейсы к АСУП; интерфейсы прикладного программирования и трансляторы.

## Список литературы

*1. Толбатов В. А.* Методика побудови інтегрованого інформаційного середовища на базі PDM та ERP систем. Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія.-2007.№1(8).-С.90-96.

*2. Толбатов В.А.* Методика побудови інтегрованого середовища промислового підприємства на базі PDM та ERP-систем. Матеріали НТК. – Суми: СумДУ.-2006.-№1.-С.79-82.

УДК: 627.534 (045)

*М.О. Українець, кандидат технічних наук,*
*Ю.О. Смирнов, аспірант*
*(Запорізька державна інженерна академія, Україна)*

# ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ОСВІТЛЮВАЧІВ ІЗ ЗАВИСЛИМ ОСАДОМ

*В тезах розглянуто застосування інформаційних технологій для дослідження технологічної надійності роботи освітлювачів із завислим осадом. Наведено поняття технологічної надійності для даного типу споруд системи водопідготовки, а також представлено результати дослідження даного типу споруд із застосуванням сучасних програмних засобів.*

В даній роботі авторами приведені результати застосування інформаційних технологій для дослідження технологічної надійності освітлювачів із завислим осадом, а саме, зв'язку швидкості висхідного потоку води в зоні освітлення, швидкості води на виході з отворів розподільчого колектора, а також швидкості руху води в осадоприймальних вікнах освітлювачів з технологічною надійністю їх роботи.

З точки зору надійності бажано мати в розпорядженні якнайбільше споруд, але занадто велика кількість споруд є економічно невиправданою. А в діючих нормативах [1] відсутні чіткі рекомендації щодо визначення необхідної кількості більшості окремих однотипних споруд на станціях водопідготовки. Серед існуючих програм для розрахунку різних елементів системи водопостачання на поточний момент немає такої, яка дозволяла б об'єктивно обґрунтовувати їх необхідну кількість та визначати чи виконує блок споруд свої функції в технологічній схемі водопідготовки.

Саме тому авторами була розроблена математична модель блоку споруд, яка дозволяє виконувати розрахунок параметрів освітлювачів та проводили дослідження технологічної надійності даних споруд. Для досліджень було використано математичну модель споруд, яка була створена в програмі MS Excel. На основі цієї моделі засобами Excel досліджено ключові показники роботи даного типу споруд та залежність їх значень від кількості споруд в роботі. На основі розрахованих даних побудовані графіки цих залежностей, а потім, шляхом апроксимації, побудовані лінії тренду, та знайдені рівняння залежностей.

Через те, що загальна теорія, яка б дозволяла оцінити технологічну надійність роботи освітлювачів чисельно, відсутня, необхідний рівень надійності при проектуванні нових споруд не враховується, а необхідна кількість споруд визначається на основі розрахункової витрати та нормативних гідравлічних характеристик їх роботи за [1]. При цьому кількість окремих споруд тієї чи іншої ланки очистки визначається інтуїтивно проектувальником без урахування технологічної надійності даних споруд. Враховуючи те, що ця кількість споруд в процесі експлуатації змінюється (необхідність проведення профілактичних та аварійних ремонтних робіт), гідравлічні характеристики, які були враховані при проектуванні, також зміняться. Для оцінки надійності роботи освітлювачів використано теоретичний метод перерахування досліджуваних параметрів по відомих формулах [2 - 4] в залежності від зміни навантаження на один освітлювач, яке визначається кількістю робочих споруд.

Дослідження проводилось за наступною методикою:

- розраховувались основні параметри роботи освітлювачів із завислим осадом при їх нормальній роботі в схемі;
- проводився аналіз залежності технологічної надійності процесу освітлення від окремих параметрів роботи освітлювачів, який дозволив виявити ті з них, що забезпечують надійність очистки води у даному типі споруд;
- визначались величини параметрів освітлювачів в умовах зменшення кількості працюючих споруд при постійній продуктивності станції;

- будувались графіки залежності необхідних показників від кількості працюючих споруд;
- проводився аналіз отриманих результатів, на основі якого зроблено висновки про надійність роботи блоку освітлювачів при відключенні різної кількості споруд;
- визначались максимальна кількість споруд, які можна відключити при роботі в аварійному режимі, без порушення технологічної надійності процесу очистки води.

Для дослідження базового варіанту було обрано схему з освітлювачами із завислим осадом коридорного типу у кількості 15 штук, розрахованих на продуктивність 150000 м3 за добу.

Основні параметри роботи освітлювачів представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 –Основні характеристики освітлювачів

| Найменування показника | Одиниця виміру | Величина |
|---|---|---|
| Діаметр поперечного розподільчого колектора | мм | 350 |
| Площа поперечного перетину розподільчого колектора | $м^2$ | 0,10 |
| Висота шару завислого осаду | М | 2,48 |
| Початкова концентрація зважених речовин у воді | мг/л | 1079,31 |
| Площа отворів колектору | $м^2$ | 0,04 |
| Площа вікон освітлювача | $м^2$ | 1,60 |
| Об'єм осадоущільнювача | $м^3$ | 57,87 |
| Середня концентрація осаду в осадоущільнювачі | $кг/м^3$ | 31,00 |
| Площа зони освітлення | $м^2$ | 121.17 |

Величини показників, які впливають на технологічну надійність роботи освітлювачів, прийняті за діючими нормами [1] і приведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Нормативні значення досліджуваних показників

| Показник, який досліджується | Норма за [1] |
|---|---|
| Швидкість висхідного потоку води, мм/с | 1 |
| Швидкість води на виході з колектору, м/с | 2 |
| Швидкість води в осадоприймальних вікнах м/с | 15 |

При відключенні частини освітлювачів розрахункові навантаження на *i*-тий освітлювач визначаються за формулою:

$$Q_i = Q \cdot N_i,$$

де $Q$ - повна продуктивність станції, $м^3$/год;

$N_i$ - число працюючих освітлювачів.

Очевидно, що зі зменшенням числа працюючих освітлювачів навантаження в перерахунку на одну споруду збільшуються, в той час як геометричні розміри, площа, об'єм одного освітлювача залишаються постійними.

Оскільки розрахункові параметри *xi=f(Qi)*, то при відключенні частини освітлювачів вони будуть змінюватись. Ці зміни були розраховані чисельними методами на ПЕОМ за допомогою програмного модулю, розробленого для середовища MS Excel на мові VBA. Результати розрахунків наведено в табл. 3.

Таблиця 3 - Зведена таблиця величин основних параметрів роботи освітлювачів в аварійних ситуаціях

| Кількість працюючих споруд | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Швидкість висхідного потоку води, мм/с | 0,996 | 1,067 | 1,149 | 1,245 | 1,358 | 1,493 | 1,659 | 1,867 | 2,133 | 2,489 | 2,987 | 3,734 |
| Швидкість води в отворах, м/с | 1,608 | 1,722 | 1,855 | 2,009 | 2,192 | 2,411 | 2,679 | 3,014 | 3,445 | 4,019 | 4,823 | 6,028 |
| Швидкість води у вікнах, мм/с | 14,88 | 15,94 | 17,17 | 18,6 | 20,29 | 22,32 | 24,8 | 27,9 | 31,89 | 37,2 | 44,64 | 55,8 |

Збільшення навантаження на один освітлювач призводить до зростання швидкості висхідного потоку води у зоні освітлення. Необхідна висота зваженого шару підтримується за рахунок примусового відведення осаду в осадоущільнювач на верхній межі та динамічної рівноваги швидкості осідання завислих частинок і їх підйому потоком води на нижній межі. Зростання швидкості висхідного потоку приведе до підйому нижньої межі шару зваженого осаду. До того часу, поки нижня межа буде знаходитись в конічній частині освітлювача, процес освітлення буде продовжуватись, хоч і з меншим ефектом. Як тільки висхідний потік підніме нижню межу вище конічної частини, процес зупиниться і почнеться виніс зважених частинок до зони освітленої води. Результати розрахунку показали, що швидкість висхідного потоку при відключенні декількох споруд коливається в широких межах від 1 мм/с до 3,73 мм/с. Таке збільшення швидкості висхідного потоку в зоні освітлення викликає виніс зважених часток до зони з проясненою водою, що спричиняє збільшення концентрації завислих речовин у воді, яка надходить до швидких фільтрів. І, таким чином, несприятливо впливає на режим роботи останніх.

З точки зору впливу на наступні за освітлювачами в технологічній схемі швидкі фільтри, потрібно забезпечити певний ефект освітлення. Для отримання достатнього ефекту освітлення контактне середовище повинне бути стійким. Стійкість шару завислого осаду залежить від таких факторів: швидкість висхідного потоку води в зоні освітлення; швидкість води на виході з отворів розподільчого колектора; швидкість руху води в осадоприймальних вікнах.

Від швидкості входу води до розподільчого колектора, та швидкості виходу з отворів колектора залежить формування структури і однорідності завислого осаду, розмір та структура часток у нижній частині зони освітлення. Максимальне значення швидкості виходу води з отворів колектора, що не призведе до порушення структури шару згідно [1] 2м/с. Збільшення навантаження на окремі освітлювачі призводить до зростання швидкості руху води в отворах дірчастого колектора з 1,6 м/с до 6 м/с.

На процес освітлення також може вплинути система відведення осаду в зону ущільнення. При підвищенні швидкості руху води в осадоприймальних вікнах можливе підсмоктування освітленої води із зони освітлення до осадоущільнювача, що погіршить процес прояснення води. За діючими нормативами [1] швидкість руху води в осадоприймальних вікнах не повинна перевищувати 15 мм/с. Дослідження швидкості руху води в осадоприймальних вікнах показало, що в даних умовах відведення осаду в осадоущільнювач відбувається зі швидкостями від 14,9 до 55,8 мм/с.

В якості основного критерію технологічної надійності роботи освітлювачів можна прийняти стійкість шару завислого осаду в зоні освітлення. Верхня межа зваженого шару підтримується за рахунок примусового відведення осаду в осадоущільнювач, а нижня - динамічної рівноваги швидкості осідання завислих частинок і їх підйому потоком води на нижній межі. Контактне середовище існує поки нижня його межа не перейде в циліндричну частину освітлювача.

В наступній частині дослідження було з’ясовано яким чином швидкість висхідного потоку води пов’язана із кількістю запроектованих робочих споруд.

Для того, щоб можна було спрощено рахувати параметри споруд при різній загальній їх кількості та при різних навантаженнях на блок однотипних споруд визначені наступні залежності:

- для швидкості висхідного потоку залежність в узагальненій формі має такий вигляд

$$V_{всх.і} = k_1 \cdot N_{роб}^{-1},$$

де $N_{роб}$ – кількість працюючих споруд,

$k_1$ – коефіцієнт зв’язку між кількістю споруд та швидкістю висхідного потоку.

Для отримання залежності коефіцієнту $k_1$ від кількості запроектованих споруд було проаналізовано різні варіанти навантаження на споруди, і різну кількість споруд.

Показники для досліджених варіантів зведено до таблиці 4.

Таблиця 4 – Зведена таблиця визначення швидкості висхідного потоку

| Продуктивність, м3/добу / Кількість робочих споруд, шт | 50000 | 100000 | 150000 | 200000 |
|---|---|---|---|---|
| 5 | 4,8323 | 4,8323 | 4,8405 | 4,8446 |
| 10 | 9,6483 | 9,6158 | 9,6483 | 9,6646 |
| 15 | 14,424 | 14,424 | 14,424 | 14,534 |
| 20 | 19,297 | 19,039 | 19,297 | 19,232 |
| 25 | 24,204 | 23,799 | 24,204 | 24,1 |
| 30 | 28,559 | 28,848 | 28,559 | 28,848 |
| 35 | 33,208 | 32,826 | 33,208 | 33,402 |
| 40 | 38,593 | 38,079 | 38,593 | 38,079 |
| 45 | 43,271 | 43,271 | 43,271 | 43,271 |
| 50 | 47,598 | 47,598 | 47,598 | 47,598 |
| 55 | 52,887 | 52,887 | 52,887 | 52,887 |
| 60 | 57,695 | 55,998 | 57,118 | 55,695 |

На досліджені продуктивності рівняння залежності має вигляд:

$$k_i = \alpha_1 \cdot N_{роб}^{-1}$$

Отже, для продуктивності 50000 м$^3$/доб коефіцієнт $\alpha_1$ = 0,9564 $N_{заг}$ + 0,30;

для 100000 м3/доб - $\alpha_1$ = 0,9473 $N_{заг}$ + 0,1846;

150000 м3/доб - $\alpha_1$ = 0,9539 $N_{заг}$ + 0,1349;

200000 м3/доб - $\alpha_1$ = 0,9416 $N_{заг}$ + 0,4109.

Ці залежності дозволяють швидко оцінити вплив кількості споруд які знаходяться в роботі на швидкість висхідного потоку, яка є основним параметром роботи освітлювачів, який впливає на технологічну надійність роботи цього типу споруд для різної кількості споруд та для різної продуктивності.

## Висновки

В результаті застосування інформаційних технологій для досліджень роботи ланки з 15 освітлювачів на станції продуктивністю 150000м$^3$/добу було виявлено, що між кількістю споруд в роботі та швидкістю висхідного потоку залежність має вигляд:

$$V_{всх.i} = k_1 \cdot N_{роб}^{-1},$$

- кількістю робочих споруд та швидкістю виходу води з отворів колектору:

$$V_o = 24{,}273 \cdot N_{роб}^{-1},$$

- кількістю робочих споруд та швидкістю води в осадоприймальних вікнах:

$$V_{ов} = 273{,}08 \cdot N_{роб}^{-1}.$$

Для технологічної надійності процесу освітлення найважливішим фактором є швидкість висхідного потоку. Залежність швидкості висхідного потоку від кількості споруд в загальному випадку має вигляд:

$$V_{всх} = (0.945 \cdot N_{заг} + a) \cdot N_{роб}^{-2}$$

## Список літератури


5. СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. – М.: Стройиздат, 1986 – 228 с.

6. *Кожинов В. Ф.* Очистка питьевой и технической воды, . – М.: Стройизат, 1971 – 210 с.

7. *Кургаев Е. Ф.* Осветлители воды. – М.: Стройиздат, 1977 – 190 с.

8. *Клячко В. А., Апельцин И. Э.* Очистка природной воды. – М.: Стройиздат, 1971 – 523 с.

УДК 621.791: 536.6

*В.А. Толбатов, к.т.н.*
*(Сумський державний університет, Україна).*

# СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

*Розглянуті питання енергозбереження на підприємстві з урахуванням його ресурсів і цілей. Представлений механізм ведення обліку і контролю споживання енергоресурсів*

В умовах фінансової кризи питання енергозбереження в промисловій галузі є важливим напрямком вирішення проблеми по зниженню затрат на виробництво продукції. В першу чергу для цього на підприємстві треба мати автоматизовану систему планування та обліку енергоресурсів, яка є частиною автоматизованої системи управління підприємством.

Для машинобудівних підприємств, що мають в своєму використанні інтегровану автоматизовану систему управління автором розроблена блок-схема розрахунку питомих норм витрати енергоресурсів (рис.1). Розрахунок питомих витрат згідно з блок-схемою призводить до найбільш оптимальних витрат енергоресурсів.

Автоматизація процесу «Планування енергоспоживання по цехах на план товарної продукції» дозволить: забезпечити ефективне і оптимальне функціонування бізнес-процесів щодо формування енергоспоживання цехами підприємства; керівництву підприємства і користувачам системи отримати повну, оперативну і достовірну інформацію для проведення поглибленого аналізу і оцінки енергоспоживання цехами підприємства і ухвалення рішень; виконати оперативний контроль споживання енергоресурсів підприємства, оперативно реагувати на зміни виробничих ситуації за рахунок інформаційної узгодженості роботи цехів і виробничих майданчиків підприємства; своєчасно надавати в систему «Бюджетування» інформацію про потребу в енергоресурсах цехами підприємства.

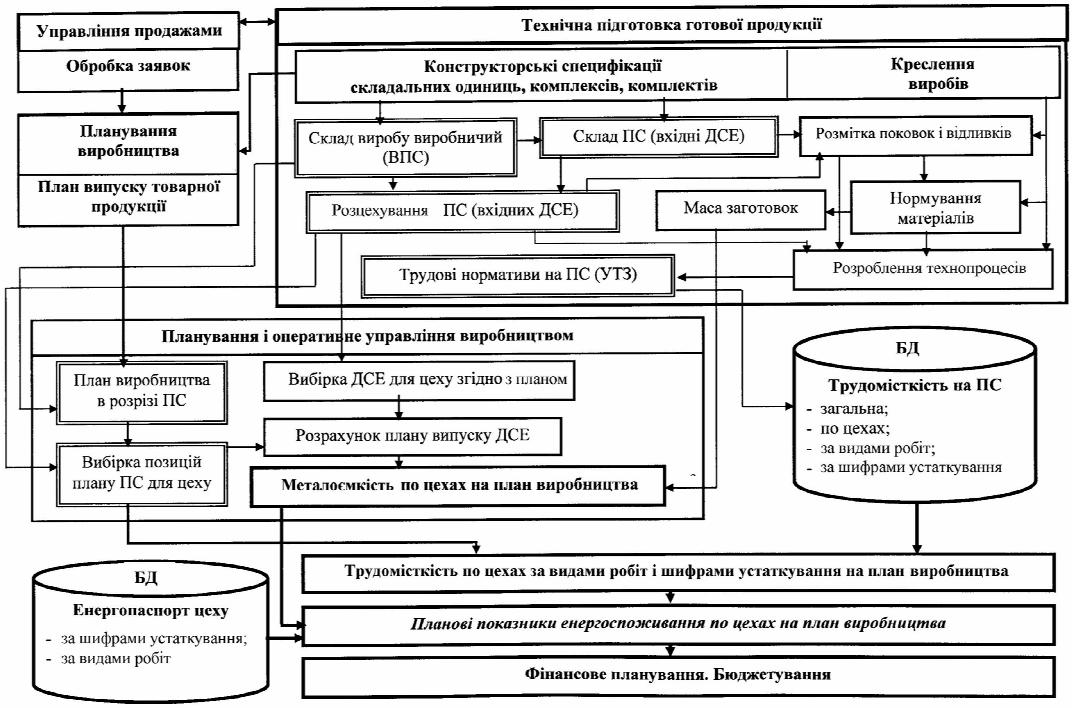



Рис. 1 – Планування енергоспоживання цехами на план випуску товарної продукції

На цеховому рівні розробляються графіки роботи цехів, змінне завдання по цехах, графіки проміжних кооперативних постачань. Проводиться аналіз забезпеченості матеріалами, розрахунок дефіциту матеріалів на виготовлення замовлень, розрахунок

тоннажу, розрахунок плану, постачання матеріалів, оформлення карток дозволу на заміну матеріалу [1].

Планове споживання енергоресурсів (на рис. 2 розміщене зліва) складається з двох складових:

Планові показники споживання електроенергії, природного газу, води, стисненого повітря і т. д., що витрачаються на виготовлення продукції по цеху, плануються виходячи з плану випуску готової продукції, опису технологічного процесу видів робіт, шифрів устаткування і наявності в базі даних енергопаспорта цеху, де зазначені параметри вживання енергоресурсів для кожної одиниці устаткування.

Загальноцехові планові витрати енергоресурсів не нормуються на одиницю випуску продукції і є постійній складовою. У основному це освітлення цехів, опалювання, вентиляція, питна і технічна вода і таке інше. Ці величини прораховуються з обліку етапів року: зима/літо.

Бюджетування підприємства розглядається як технологія управління, заснована на розробці бюджету підприємства, який є основним інструментом планування, регулювання, контролю, аналізу і оцінки діяльності центрів відповідальності і підприємства в цілому.

Мета процесу «Бюджетування» — створення ефективної системи управління ресурсами підприємства і забезпечення на цій основі стабільного поліпшення фінансово-економічних результатів його діяльності *(зростання прибутку, підвищення рентабельності активів, збільшення операційного грошового потоку, капіталу і ін.)*.

З системи «Планування енергоспоживання по цехах на план товарного випуску» в систему «Бюджетування» передається план витрати грошових коштів зо енергоресурсів по цехах на план товарного випуску.

Механізм ведення обліку і контролю споживання енергоресурсів цехами, дільницями і виробництвами подані на схемі контролю використання енергоресурсів (рис. 2).

Фактичні відомості споживання енергоресурсів по цехах (на схемі справа) знімаються з лічильників енергоресурсів, і за каналами передачі даних збігаються в базі даних (БД) автоматизованої системи контролю обліку енергоресурсів (АСКОЕ).

- АСКОЕ призначене для виконання функцій: комерційного і технічного обліку споживання електроенергії для кожної точки обліку; забезпечення персоналу оперативною інформацією для управління споживанням електроенергії; складання балансів електроенергії і потужності; побудова графіків навантаження; ведення тарифів, диференційованих за часом; передача інформації в енергозабезпечувальну організацію; передача інформації на АРМ-користувача.

АСКОЕ реалізує такі завдання: збір інформації про параметри електроспоживання з контрольованих об'єктів; формування оперативної бази даних електроспоживання; оперативний контроль і управління режимами електроспоживання; контроль і аналіз технологічного електроспоживання; статистична обробка графіків електроспоживання; діагностика стану всіх приладів, що входять в систему; формування відомостей і звітних документів про споживання потужності й енергії; контроль відхилення частоти і напруги; контроль перетікань реактивної потужності; набуття моментних значень активної і реактивної потужності, частоти напруги; отримання і аналіз коефіцієнта потужності.

Архітектура АСКОЕ забезпечує точність, достовірність і одночасність отримання даних про облік електроенергії.

В основу АСКОЕ покладено принципи відкритості архітектури, відкритості комунікацій і розподіленого функціонування. Це забезпечує незалежність від технічних засобів обліку і систем зв'язку, легку інтеграцію в існуючі системи обробки даних, поетапне

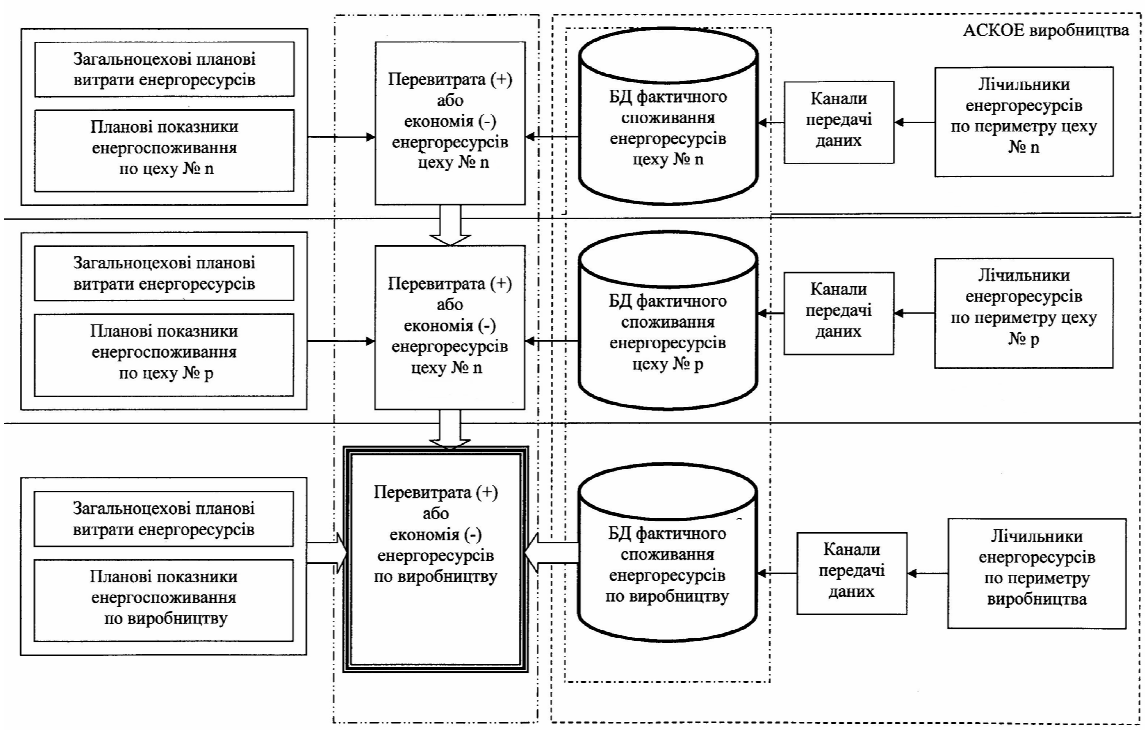



Рис. 2 – Схема контролю використання енергоресурсів

розширення АСКОЕ і адаптація до поточних вимог з мінімальними витратами. У той самий час, кожна компонента АСКОЕ забезпечує узгоджений захист даних від несанкціонованого доступу, а також їх безпеку й цілісність.

Архітектура АСКОЕ складається з трьох системних компонентів: *вимірювального рівня; комунікаційного середовища; рівня обробки даних і управління використанням енергії.*

*Вимірювальний рівень* містить вимірювальні трансформатори струму і напруги, лічильники електроенергії, пристрої обліку і лінії, що сполучають їх, і канали зв'язку. Результатом роботи даного рівня є значення параметрів споживання енергії, забезпеченої ознаками якості (початкове, достовірне, введене вручну, виправлене і т. ін.), тимчасовими позначками їх отримання.

*Комунікаційне середовище* забезпечує надійне транспортування інформації між вимірювальним рівнем і рівнем обробки й управління без порушення її достовірності.

*Рівень обробки й управління* виконує збір, зберігання, обробку облікової інформації, аналіз, планування й управління споживанням електроенергії. На цьому рівні здійснюються взаємозв'язок з енергозабезпечувальною компанією (ЕЗК), інтеграція з іншими програмно-технічними комплексами автоматизації.

## Висновки

Наведена методика планування і контролю використання енергоресурсів дозволяє зробити процес впровадження планування і контролю використання енергоресурсів на підприємствах машинобудівної галузі прозорим і зрозумілим для всіх його учасників за рахунок чіткої формалізації всіх етапів та розмежування між ними, що дає можливість відповідальному персоналу підприємства розробляти і контролювати систему енергозбереження на підприємстві з урахуванням його ресурсів і цілей.

## Список літератури

1. *Толбатов В.А.* Аналітичне дослідження завантаження обладнання технологічних підприємств машинобудівної галузі //Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.-2005.- №2.

УДК 004:378(477,46)

*А.И. Боровик, к.т.н, доцент,*
*Ю.Г. Нестеренко, ст. преподаватель,*
*Е.А. Серков, ст. преподаватель*
*(Черкасский государственный технологический университет, Украина)*

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПЕЦИАЛИЗОВАННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ВУЗА

*В предлагаемой работе авторы представляют свою точку зрения на методы обучения в технических ВУЗах компьютерным технологиям, рассказывают об опыте применения и деятельности кафедры компьютеризированных технологий машиностроения.*

Современное производство наукоёмкой продукции развивается в направлении полного перевода на информационные технологии ключевых этапов жизненного цикла изделия – проектирование, производство, эксплуатация и утилизация. В связи с этим, преподаватели факультета компьютеризированных технологий машиностроения (ФКТМ) Черкасского государственного технологического университета (ЧГТУ) своей главной задачей считают обучение студентов технических специальностей современным компьютерным технологиям. Для решения этой задачи ФКТМ ЧГТУ ещё с 1993 года начал подготовку специалистов, которые осваивают программно-технические средства подготовки производства, работают с компьютерными системами автоматизации проектных и расчётных работ. В учебном процессе ФКТМ ЧГТУ в разное время использовались следующие интегрированные CAD/CAM/CAE-системы: ADEM, Cimatron, КОМПАС (и его модули КОМПАС-График, КОМПАС-Автопроект, Вертикаль), T-FLEX (и его модули INIS, САПР ИМ, ТехноПро, Технология, T-FLEX-ЧПУ), AutoCAD, Inventor и др.

Защита дипломных проектов по специальности «Технология машиностроения» с использованием компьютерных технологий также началась с 1993 года. Одна из первых деталей дипломного проекта, спроектированная в CAD/CAM системе высокого уровня «Cimatron» представлена на рисунке 1. Система «Cimatron» успешно использовалась при проектировании конструкторской документации в дипломных работах при создании особо сложных поверхностей деталей.

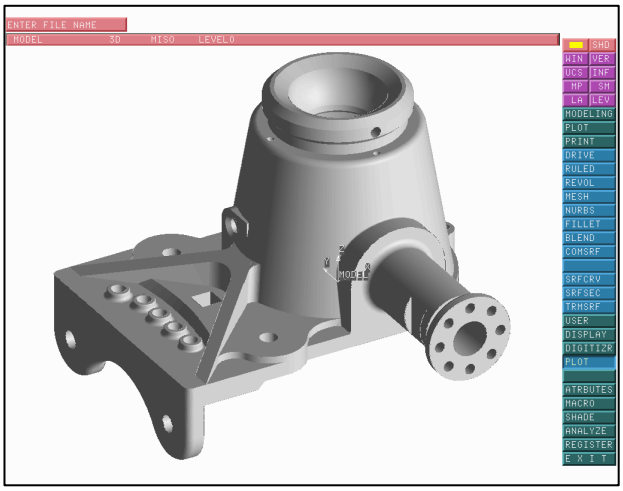



Рис. 1 – Трёхмерная модель детали дипломного проекта, выполненная в 1993 году в системе Cimatron

Начиная с 1994 года по 2000 год, приоритетным направлением внедрения компьютерных технологий на факультете стала CAD/CAM система среднего класса ADEM. В этот период были созданы разные трёхмерные модели режущих и измерительных инструментов, компьютерные модели штампов, модели деталей дипломных проектов. Особое внимание при

этом уделялось разработке в автоматизированном режиме управляющих программ для станков с ЧПУ.

Наиболее широко компьютерные технологии начали использовать студенты третьего курса технических специальностей в дисциплине «Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения» (ВСТИ). Результатом курсовой работы по дисциплине ВСТИ были сборочные чертежи машиностроительных изделий с указанием допусков и посадок, а также чертежи отдельных деталей. Лучшие студенты дополняли графическую часть курсовой работы трёхмерными моделями заданных узлов и деталей. Развитием курсовой работы по дисциплине ВСТИ стало, в дальнейшем, создание мультимедийных методических материалов по проектированию трёхмерной модели конического редуктора с использованием CAD/CAM системы T-FLEX.

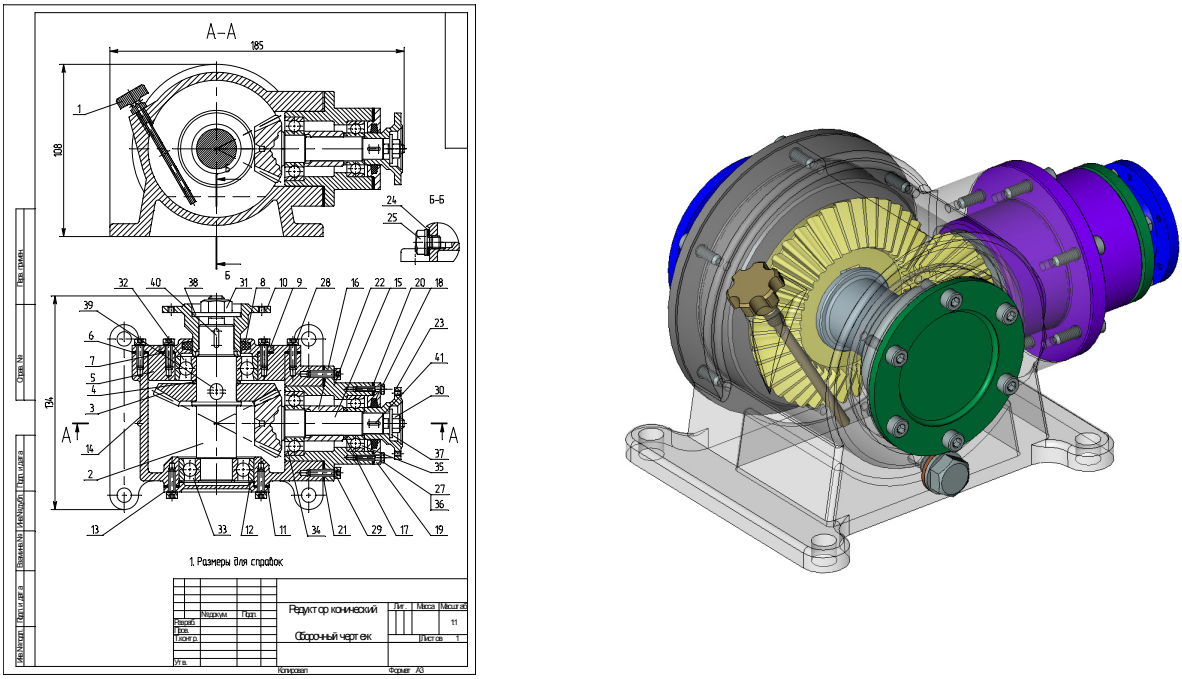



Рис. 2 – Сборочный чертёж конического редуктора курсовой работы по ВСТИ и его трёхмерная сборочная модель , выполненная в системе T-FLEX

Мультимедийное обучение (МО) предполагает, прежде всего, использование в процессе обучения озвученных преподавателем видеороликов при работе с разными компьютерными программами, а также подготовку специальных презентаций с использованием аудио и видеоинформации технического назначения. Озвученные видеоролики являются компьютерной записью приёмов работы преподавателя, при этом значительно сокращаются сроки изучения материала, а также есть возможность выбора конкретных упражнений для потребностей любого пользователя.

В 1995 году студенты ФКТМ ЧГТУ приняли участие в международной компьютерной олимпиаде по инженерной и компьютерной графике в г. Н. Новгород, где заняли 4-е место в конкурсе трёхмерного моделирования (3D).

В 1997 году Министерством Образования Украины было принято решение о проведении на базе Черкасского инженерно-технологического института (в настоящее время ЧГТУ) Всеукраинских студенческих компьютерных олимпиад.

Интенсивное обучение системам КОМПАС и КОМПАС-Автопроект на ФКТМ ЧДТУ началось с 2000 года. Эти системы в дальнейшем получили наибольшее признание в учебном процессе среди преподавателей и студентов.

Начиная с 2003 года предприятия Черкасского региона стали внедрять в производство систему T-FLEX, поэтому руководством ВУЗа было принято решение о внедрении её в учебный процесс ФКТМ.

В 2004 году на ФКТМ была создана лаборатория компьютерных технологий (КТ), целью которой является:

- сбор информации о современном уровне развития техники и КТ, использование её в учебном процессе факультета;
- проведение методических семинаров с преподавателями ФКТМ;
- консультация преподавателей и специалистов машиностроительных предприятий Черкасского региона при работе с разными программами трёхмерного проектирования;
- создание мультимедийных средств обучения;
- формирование электронной технической библиотеки;
- подготовка студентов к Всеукраинским и международным компьютерным олимпиадам.

Широкое использование современных КТ в учебном процессе ФКТМ ЧГТУ дало возможность участвовать нашим студентам в международных олимпиадах по компьютерной графике и стать победителями в конкурсах по трёхмерному моделированию.

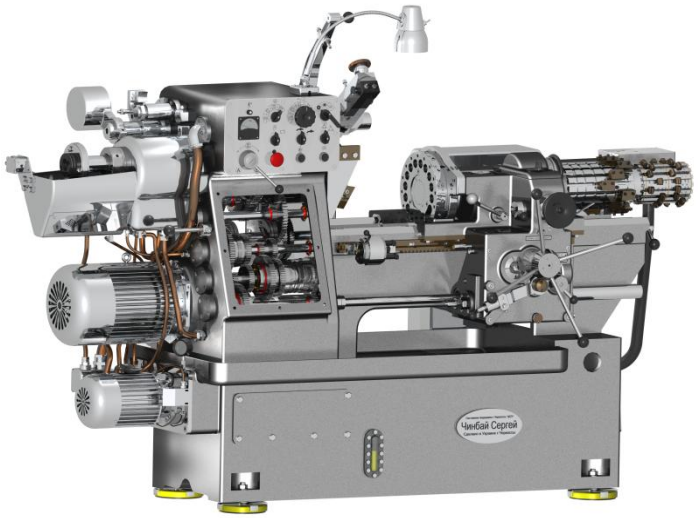


Рис. 3 – Трёхмерная модель токарно-револьверного станка мод.1341.
занявшая 1 место в международном конкурсе,
организованным компанией ТопСистемы в 2007 году

Начиная со второй половины 2006 года, на ФКТМ начали создавать экспериментальные компьютерные работы в виде видеороликов, освещающих роботу технических систем (ТС) с использованием мультипликации и монтажа видео со звуком. После создания студентами трёхмерных моделей ТС в компьютерных системах T-Flex и КОМПАС, они дорабатывались специализированными программами с возможностью монтажа звука и видео (Adobe Audition, VirtualDub, Camtasia) с различными спецэффектами. В процессе создания презентаций и видеороликов с использованием компьютерных моделей применялись фото соответствующих ТС, музыкальное и речевое сопровождение.

Общеизвестно, что трёхмерная модель ТС даёт наиболее полное представление о конструкции изделия и его составных частей, даёт возможность проведения инженерного и динамического анализа с целью выявления «слабых» элементов конструкции, а также фотореалистического изображения объекта проектирования для дизайнерских решений. Создание трёхмерной модели позволяет в полном объёме получить полный комплект как

конструкторской, так и технологической документации при подготовке производства новых изделий с учётом требований ЕСКД и ЕСТД .

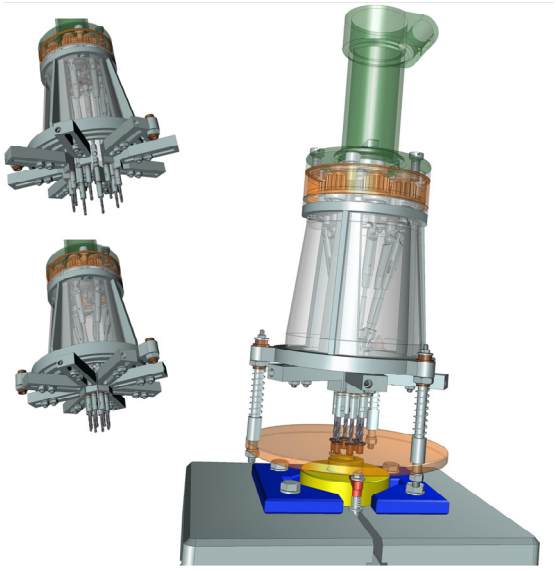


Рис. 4 – Трёхмерная модель «Сверлильной головки»
награждена на международной выставке Softool-2008, г.Москва

**Выводы**

Многолетний опыт использования КТ в учебном процессе ФКТМ ЧГТУ позволяет сделать следующие выводы:

- выпускники, владеющие КТ, могут наиболее быстро адаптироваться к любому производству в современных условиях;
- повысились интерес к изучению компьютерных программ, качество обучения, а также сократились сроки усвоения материала;
- применение КТ позволило усовершенствовать методологию обучения и послужило толчком к созданию мультимедийных средств обучения (МСО);
- анимационные видеоролики со звуковым сопровождением позволяют наглядно изучать работу механизмов и оборудования, которое используется в машиностроении и других отраслях;
- МО даёт возможность пользователям самостоятельно (особенно для студентов заочной формы) за минимальное время получить максимальный объём информации;
- в специализированных компьютерных классах студенты имеют возможность независимо друг от друга прослушивать, повторять и изучать видеоролики выбранной системы проектирования;
- в дипломных и курсовых работах студентов, благодаря МО, всё чаще стали появляться презентационные ролики, которые становится весьма полезными для выпускников в их дальнейшей самостоятельной работе.

УДК 621.001.85

*О.М. Чередніков, канд. техн. наук,*
*М.Є. Юрченко, канд. фіз-мат. наук,*
*О.О. Корольов, канд. техн. наук,*
*О.О. Борисов, аспірант*
*(Чернігівський державний технологічний університет, Україна)*

# АНАЛІЗ ЗАКОНІВ РОЗПОДІЛУ ЗАМИКАЮЧОЇ ЛАНКИ ЗА ДЕЯКИМИ МЕТОДАМИ МОДЕЛЮВАННЯ

*Вирішуються проблема використання теорії імовірності для умов дрібносерійного та одиничного механоскладального виробництва в контексті теорії розмірних ланцюгів.*

Моделі технічних систем відображаються сукупністю взаємопов'язаних елементів для виконання заданих функцій з метою досягнення бажаних результатів [1]. Виявлення зв'язків як спосіб фіксації об'єктивно існуючих залежностей і відносин між елементами системи, те що з'єднує об'єкти ті їх властивості в системному процесі, забезпечуючи результат дії реалізується в системі зв'язків підготовлення і впровадження в виробничий процес, який являє собою іншу систему множин зв'язків: властивостей матеріалів, розмірних, інформаційних, часових і економічних. Зв'язки підпорядковуються закономірно існуючим чинникам, які були визначені в роботах багатьох авторів в 30х роках минулого століття[2,3].

Навіть в умовах стабільно працюючого та налагодженого виробництва величини, що підпорядковуються законам нормального та рівновірогідністного розподілу безперервно змінюються та впливають на показники якості продукції.

Показники всіх видів зв'язків виробничого процесу мають випадкові відхилення. Від своїх номінальних значень відхиляються показники властивостей матеріалів заготовок, інструменту, деталей, устаткування. Випадкові відхилення виникають у ланках всіх видів розмірних зв'язків. Інформаційні зв'язки супроводжуються перешкодами і збоями. Коливаються витрати часу на реалізацію всіх частин виробничого процесу.

При розрахунку розмірних ланцюгів найчастіше застосовують закон нормального розподілу, закон рівної імовірності, закон трикутника а також закони Максвела і модулі різниці нормально розподілених величин.

До основних показників, які впливають на надійність машини можна віднести стабільність розмірних зв'язків. В умовах використання уніфікованих технологічних процесів автоматизованого механоскладального виробництва якість продукції, що виготовляється, залежить від вибору допуску на налагодження технологічної системи. Розрахунки за методом повної взаємозамінності ( максімуму-мінімуму ) призводять до ужесточения вимог на складові ланки складальних одиниць та ужесточения допусків на налагоджувальні розміри технологічної системи при механічній обробці. Використання статистичних методів є складним через обмежену номенклатуру виробів та кількість результатів вимірювання вихідних параметрів технологічних систем складових та замикаючих ланок. Тому використання імітаційного моделювання дозволяє підвищити достовірність розрахунків з метою підвищення якості технологічних систем, що в свою чергу зменшить появу браку.

Для заданих розмірів вибірок деталей змоделювати п'яти ланкові складальні розмірні ланцюги. Експериментально виконати складання вузла з випадкових деталей отримати закон поля розсіювання розмірів замикаючої ланки. Визначити необхідну кількість варіацій для досягнення заданої імовірності (Р) наближення імовірнісного методу до методу максимума-мінімума ( повної взаємозамінності).

Для заданих розмірів вибірок деталей змоделювати трьох, чотирьох і п'яти ланкові складальні розмірні ланцюги, побудувати закони полів розсіювання розмірів кожної з ланок. Шляхом математичного моделювання і підрахунків отримати закон поля розсіювання

замикаючої ланки. Порівняти отримані значення з допуском замикаючої ланки, розрахованого методом максимума-мінімума.

Максимальне і мінімальне значення кожної з складових ланок враховуються при розрахунку за методом повної взаємозамінності:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 20,04 | 35,55 | 20,03 | 20,09 | 15,08 | 110,79 |
| 19,8 | 35,31 | 19,87 | 19,95 | 14,96 | 109,89 |

Величина допуску замикаючої ланки для даної сукупності деталей дорівнює $T_\Delta$=0,9. В залежності від кількості ітерацій складального процесу допуск замикаючої ланки змінюється і при $k \to \infty$ наближується до $T_\Delta$=0,9.

Вірогідність розраховувалась використовуючи закон нормального розподілу. Кожна вибіркова сукупність перевіряється на нормальність розподілу за критерієм Фішера.

Алгоритм моделювання полягає в виконанні етапів в циклічному режимі до отримання заданої величини узгодження ланцюга.

| Етап розв'язання | Пряма задача (синтез) | Зворотна задача (аналіз) |
|---|---|---|
| 1 Виявляють і фіксують розмірний ланцюг | Формулюють задачу, виявляють замикаючу і складові ланки, будують схему розмірного ланцюга, визначають передатні відношення ланок | |
| 2 Попередні розрахунки | | |
| 2.1 Визначають допуск замикаючої ланки | $T_\Delta = \Delta_{в_\Delta} - \Delta_{н_\Delta}$ | |
| 2.2 Визначають координату середини поля допуску замикаючої ланки | $\Delta_{0_\Delta} = 0{,}5 \cdot (\Delta_{в_\Delta} - \Delta_{н_\Delta})$ | |
| 3 Узгодження номіналів ланок | | |
| 3.1 Задають номінальні значення $A_i$ складових ланок | | |
| 3.2 Розраховують номінальні значення $A_{\Delta_p}$ замикаючої ланки | $A_{\Delta_p} = \sum_{i=1}^{m-1} c_i \cdot A_i$ | |
| 3.3 Перевіряють правильність задання $A_i$ | $r_A = A_\Delta - A_{\Delta_p}$ | |
| 3.4 Вибирають узгоджуючи ланку /ланки/ і визначають її розмір | $\vec{A}_{iy} = \vec{A}_y + r_A$<br>$\overleftarrow{A}_{iy} = \overleftarrow{A}_y - r_A$ | |
| 4 Узгодження допусків ланок | | |
| 4.1 Визначають допуски ланок $T_{ic}$, що належать стандартним деталям | $T_{ic} = \Delta_{в_c} - \Delta_{н_c}$ | |
| 4.2 Визначають допуски $T_i$ інших складових ланок | | $T_i = \Delta_{в_i} - \Delta_{н_i}$ |
| 4.2.1 Визначають параметр $i$ | | |
| 4.2.2 Визначають число $a$ | $a = \frac{T_\Delta - \sum_{i=1}^{nc} T_{ic}}{\sum_{i=1}^{n} i_i}$ | |

| | | |
|---|---|---|
| 4.2.3 Визначають квалітет точності | | |
| 4.2.4 Призначають допуски $T_i$ складових ланок | | |
| 4.3 Визначають розрахункове значення $T_{\Delta_p}$ замикаючої ланки | $T_{\Delta_p} = \sum_{i=1}^{m-1} / c_i / T_i$ | |
| 4.4 Перевіряють узгодженість допусків складових ланок | $r_T = T_\Delta - T_{\Delta_p}$ | |
| 4.5 Вибирають узгоджуючи ланку (ланки) і визначають допуск $T_{iy}$ на неї | $T_{iy} = T_i + r_T$ | |
| 5 Узгодження граничних відхилень ланок | | |
| 5.1 Визначають координати середин полів допусків складових ланок і замикаючої ланки | $\Delta_{0_i} = 0{,}5 \cdot (\Delta_{в_i} - \Delta_{н_i})$<br>$\Delta_{0_{\Delta_p}} = \sum_{i=1}^{m-1} c_i \cdot \Delta_{0_i}$ | |
| 5.2 Перевіряють узгодженість граничних відхилень складових ланок | $r_0 = \Delta_{0_\Delta} - \Delta_{0_{\Delta_p}}$ | |
| 5.3 Вибирають узгоджуючу ланку (ланки) і визначають координату $\Delta_{0_{iy}}$ середини її поля допуску | $\Delta_{0_{iy}} = \frac{1}{c_{iy}} \cdot (\Delta_{0_\Delta} - \sum_{i=1}^{m-2} c_i \cdot \Delta_{0_i})$ | |
| 5.4 Визначають граничні відхилення узгоджуючої ланки | $\Delta_{в_{iy}} = \Delta_{0_{iy}} + 0{,}5 \cdot T_{iy}$<br>$\Delta_{н_i} = \Delta_{0_{iy}} - 0{,}5 \cdot T_{iy}$ | |
| 5.5 Перевірка розв'язку. Граничні відхилення $\Delta_{в_{\Delta_p}}$ і $\Delta_{н_{\Delta_p}}$ замикаючої ланки | $\Delta_{в_{\Delta_p}} = \sum_{i=1}^{n} \Delta_{в_{\bar{i}}} - \sum_{n+1}^{m-1} \Delta_{н_{\bar{i}}}$<br>$\Delta_{н_{\Delta_p}} = \sum_{i=1}^{n} \Delta_{н_{\bar{i}}} - \sum_{n+1}^{m-1} \Delta_{в_{\bar{i}}}$<br>$\Delta_{в_{\Delta_p}} = \Delta_{в_\Delta}$ ; $\Delta_{н_{\Delta_p}} = \Delta_{н_\Delta}$ | |
| 6 Аналіз результатів | Аналізують відповідність розрахованих граничних відхилень складових ланок їх стандартним значенням і технологічним можливостям виробництва, узгодженість допусків з економічною точністю методів обробки, при необхідності виконують відповідну корекцію | |

Проведено моделювання замикаючої ланки для п'яти ланкові складального розмірного ланцюга при 5,10…30 реалізаціях з результатів 100 вимірювань кожної ланки. Результати вимірювання партії деталей що поступають до складальної операції перевірялись на наявність промахів і на належність певному закону розподілу.

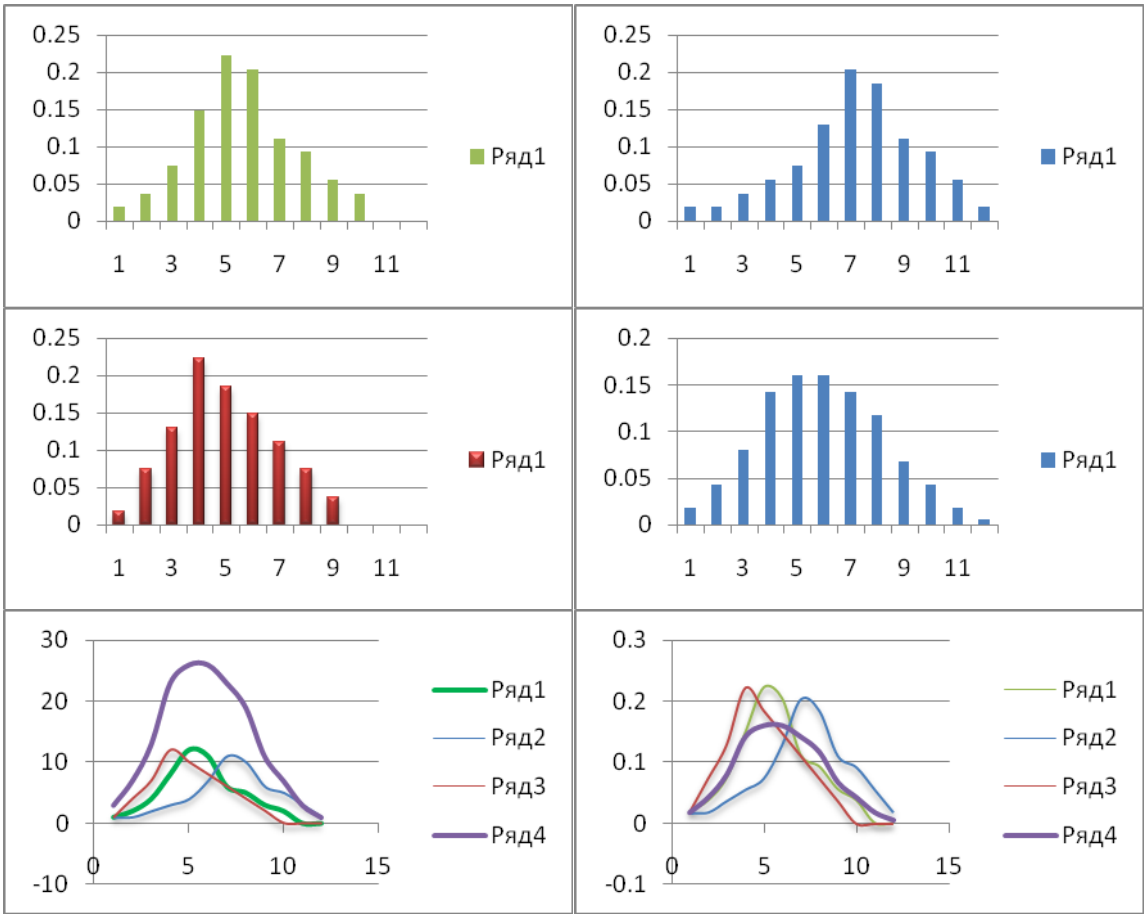



Рис 1. Гістограми експериментальних даних та криві розподілу

Розрахунок коефіцієнта відносної асиметрії в залежності від кількості вимірювань змінює своє значення і наближується до довідкових даних тільки при $k \to \infty$, що не відповідає умовам використання методу неповної взаємозамінності.

## Список літератури


1. Размерный анализ конструкций: Справочник / *С.Г. Бондаренко, О.Н. Чередников, В.П. Губий, Т.М. Игнатцев*; Под. общ. ред. канд. техн. наук *С.Г. Бондаренко*.– К.: Тэхника, 1989.– 150с.
2. *Балакшин Б.С.* Теория и практика технологии машиностроения: Основы технологии машиностроения. — М.: Машиностроение, 1982.— 367 с.
3. *Бондаренко С.Г.* Розмірні розрахунки механоскладального виробництва.-К.: ІСДО, 1993.-544с.
4. *Фридлендер И. Г.* Расчеты точности машин при проектировании.— Киев; Донецк: Вища шк., 1980.— 182 с.

УДК 658.012.011.56:061.5/.6

*С.А. Дорошенко*
*(Сумское НПО им. М.В. Фрунзе, Украина)*

# КОМПЛЕКСНАЯ АВТОМАТИЗАЦИЯ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО РАСШИРЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА

*Рассматриваются вопросы интеграции систем PDM, ERP, MES в условиях многономенклатурного машиностроительного производства и предложена концептуальная модель интегрированной информационной системы управления предприятием.*

Современные рыночные отношения производителей продукции давно поставили мировое сообщество перед необходимостью применения информационных технологий, которые создают условия для существенного повышения качества выпускаемой продукции, сокращая сроков разработки и изготовления новых, более совершенных изделий. В этой связи и управление современным предприятием требует все большей оперативности.

Говоря о продукции машиностроения, о процессах, которые происходят на всех этапах ее жизненного цикла (ЖЦ) от создания до утилизации, нельзя не заметить, что наибольшие положительные результаты в вопросах управления производством этой продукции возможно достигнуть лиши при создании единого информационного пространства (ЕИП) управления этими процессами и применении CALS-технологий, обеспечивающих непрерывную информационную поддержку ЖЦ продукта на всех его стадиях. Информационные базы данных о продукции, в которых имеется актуальная, определенным образом структурированная информация об изделии (3D модели, параметры, состав, материал, технические требования и т.д.) и технологических процессах его изготовления, позволяют с применением ЕИП и современных систем управления успешно решать вопросы автоматизации управления производством этой продукции.

Чтобы сегодня повысить эффективность управления предприятием, необходимо использовать и эффективную информационную систему, созданную на основе современных методов управления (управление ресурсами по стандарту MRPII, бюджетное планирование, процессный и проектный подход к управлению и т.д.). Построение эффективной информационной системы управления требует решения двух основополагающих задач:

- комплексной автоматизации технической (конструкторской и технологической) подготовки производства, в результате которой мы должны иметь полную информацию об изделии, запускаемом в производство, и его составных частях;
- автоматизации планирования и управления производственной деятельностью.

За решение этих задач отвечают системы разного класса:

- системы класса CAD/CAM/CAE автоматизируют такие функции, как проектирование изделий, анализ их конструкций, разработку управляющих программ станков с ЧПУ;
- CAPP-системы (Computer-Aided Process Planning) автоматизируют процесс технологической подготовки производства, а именно планирование (написание) технологических процессов;
- PDM-системы (Product Data Management) обеспечивают управление данными об изделиях и могут выступать интеграторами систем CAD/CAM/CAE и CAPP;
- системы класса ERP (Enterprise Resource Planning System) обеспечивают управление ресурсами предприятия;
- MES-системы (Manufacturing Execution System) обеспечивают оперативно-календарное планирование и диспетчеризацию изготовления продукции.

Построение эффективной информационной системы предприятия, особенно в условиях многономенклатурного машиностроительного производства, возможно только при условии интеграции этих систем на основе создания ЕИП и центральным звеном такой интеграции

для продукции машиностроительных отраслей выступает состав изделия, информация по которому представляется по-разному в зависимости от этапа его ЖЦ.

Так при проектировании изделия конструктор строит его состав по функциональному назначению узлов и деталей, а для решения задачи планирования изготовления этого изделия нам важен его технологический состав, который определяется порядком агрегатной и окончательной сборки и составом требуемых для этого комплектующих. Такие данные позволяют в многономенклатурном производстве построить циклограммы сборки, которые в свою очередь позволят составить графики запуска составных частей изделий (деталей и узлов) в производство и спланировать требуемые ресурсы для их изготовления [1].

На рисунках 1 и 2 приведен пример составов одного и того же изделия, спроектированного с применением различных CAD-систем (CAD1, CAD2, CAD3) под управлением единой PDM-системы, а на рисунке 3 показан технологический состав этого изделия, который определяет порядок вхождения составных частей 1 – 6 в единую сборку.

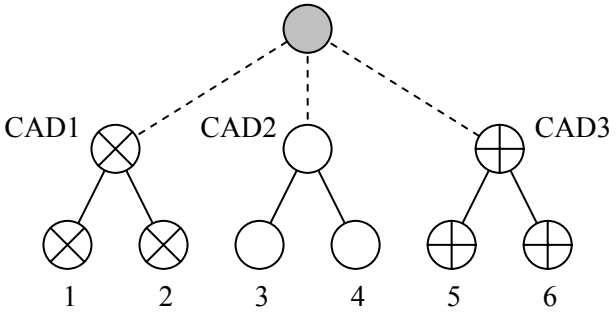



Рис.1. Конструкторский состав изделия, разработанного в различных CAD-системах.

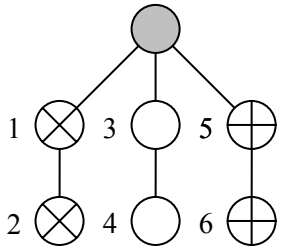



Рис.2. Конструкторский состав изделия в единой PDM-системе.

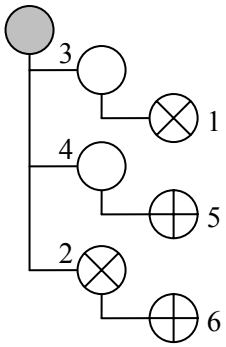



Рис.3. Технологический состав изделия, определяемый порядком общей сборки.

В чем сложность создания интегрированной системы управления?

Задачу интеграции систем CAD/CAM/CAE, CAPP и PDM современные PDM-системы решают [2]. Задача же интеграции PDM, ERP и MES-систем имеет много подводных камней, которые, прежде всего, касаются методологических и организационных вопросов.

Построение ЕИП требует, чтобы данные, подготавливаемые в PDM-системе, отвечали не только требованиям, предъявляемым конструкторами и технологами к изделию, но и требованиям систем ERP и MES. Первым по важности вопросом, непосредственно

влияющим на результат и эффективность интеграции, является вопрос организации работ. Организационные трудности связаны с тем, что в работе над подготовкой данных задействовано большое количество пользователей, принадлежащих к разным «лагерям» и имеющих разные цели. Организация их слаженной работы и согласование разнородных целей подразделений предприятия является одним из ключевых факторов успеха этого процесса.

На рисунке 4 приведена предлагаемая концептуальная модель интегрированной информационной системы управления машиностроительным предприятием с многономенклатурным производством изделий. На модели указаны основные функции, выполняемые PDM, ERP и MES-системами.




Рис.4. Концептуальная модель интегрированной информационной системы управления машиностроительным предприятием с многономенклатурным производством.

В условиях многономенклатурного производства интеграцию систем, представленных на рисунке 4, предлагается обеспечивать двумя способами:

- посредством организации экспорта/импорта данных;
- посредством использования API-интерфейсов или организации прямого взаимодействия систем между собой.

С вопросом технологии интеграции тесно связан выбор степени интеграции: можно реализовать однонаправленную, а можно – двухстороннюю интеграцию.

Наиболее целесообразной представляется реализация, когда для каждого вида данных определяется его первоисточник, который и служит основой для однонаправленной передачи данных в другую систему. Данный подход в условиях большого числа пользователей, использующих информационную систему и имеющих различные права доступа к ее объектам, наиболее прозрачен и жизнеспособен на практике.

При интеграции систем должна быть предусмотрена возможность:

- выбора разных объемов передаваемых данных из системы в систему;
- использования «ручного» и автоматического принципа экспорта данных (по событию);
- мониторинга процедур экспорта/импорта с фиксированием количества передаваемых данных, а в случае возникновения ошибок, регистрацией их для анализа и корректировки исходных данных.

Для обеспечения единства данных, во всех системах должна использоваться единая кодировка, присваиваемая в момент создания тех или иных объектов. Дополнительно, для полноты данных в системах, должно поддерживаться единство ряда базовых справочников (изделий, материалов, оборудования, подразделений, единиц измерения и др.). Обязательным условием для интеграции является обеспечение целостности данных. Обеспечение этого условия возлагается как на сам механизм интеграции, который должен обеспечивать проверку целостности передаваемых данных, так и на системы, являющиеся первоисточниками данных.

В ходе подготовки к интеграции систем должны быть решены все вопросы, связанные с кодификацией. Это вопрос важен как для базовых справочников, так и с точки зрения срезов информации, по которым впоследствии будет выполняться планирование и анализ ресурсов, анализ результатов производственной и финансовой деятельности как предприятия в целом, так и его функциональных подразделений для принятия управленческих решений.

Интегрированная информационная система управления машиностроительным предприятием с многономенклатурным производством предполагает переработку огромного объема информации, и определяющим здесь является качество информации, которое напрямую зависит от состояния нормативно-справочной информации (НСИ) предприятия. Система управления НСИ в интегрированной информационной системе управления предприятием с многономенклатурным производством является связующим звеном всех систем – ядром интеграции.

ERP-системы ориентированы на планирование выполнения заказов, т.е. отвечают на вопрос: когда и сколько продукции должно быть произведено. В ERP системах, по причине большого объема административно-хозяйственной и учетно-финансовой информации, которая, непосредственного влияния на производственный процесс не оказывает, перепланирование производства может осуществляться не чаще одного раза в сутки.

MES-системы фокусируются на вопросе: как в действительности продукция производится, и оперируют более точной информацией о производственных процессах. Главное отличие MES от ERP заключается в том, что MES системы, оперируя исключительно производственной информацией, возникающей непосредственно в цехе или на участке, позволяют корректировать либо полностью пересчитывать производственные задания в течение рабочей смены столько раз, сколько это необходимо.

**Выводы.** Предложенная концептуальная модель интегрированной информационной системы управления может быть применена для создания на машиностроительном предприятии эффективной информационной системы, которая за счет быстрой реакции на происходящие события непосредственно в производстве и применения математических методов компенсации отклонений от производственного расписания, позволит оптимизировать производство и сделать его более рентабельным.

## Список литературы


1. *Бочкарев П.Ю., Васин А.Н.* Планирование технологических процессов в условиях многономенклатурных механообрабатывающих систем. Теоретические основы разработки подсистем планирования маршрутов технологических операций: Уч. пособие. – Саратов: СГТУ, 2004. – 136с.
2. *Павленко П.М.* Автоматизовані системи технологічної підготовки розширених виробництв. Методи побудови та управління: Монографія. – К..: Книжкове вид-во НАУ, 2005. – 280 с.

УДК 005.311.2:004.94

*В.В. Трейтяк, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЕКТНО-ВИРОБНИЧИХ ДАНИХ ПІДПРИЄМСТВ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИМИ ЗАСОБАМИ ARIS

*Розглянуто моделювання проектно-виробничих даних промислових підприємств інструментальними засобами програмного продукту ARIS, завдяки яким створюються передумови для подальшого аналізу, удосконалення та реорганізації бізнес-процесів на підприємстві. Представлено реальну модель життєвого циклу замовлення машинобудівного підприємства реалізованого методом опису процесів ARIS eEPC*

Більшість керівників сучасних українських підприємств розуміють необхідність проведення проектів, які зв'язані з такими новими течіями в управлінні, як перехід до процесного підходу до функціонування підприємства, реорганізації та постійного удосконалення процесів, впровадження автоматизованих систем управління і т.д.

Реалізація подібних проектів потребує збору, накопичення, систематизації та аналізу інформації про підприємство, яка б дозволила отримувати відповіді на наступні питання:

- хто та при яких умовах приймає ті чи інші рішення?
- яка при цьому потрібна інформація?
- які комп'ютерні системи ми використовуємо в даний момент?
- які методики потрібно використовувати при виконанні операцій та де зберігаються дані про ці методики?

Кожний співробітник підприємства має відповіді на деякі з поставлених запитань, які стосуються його компетенції та сфері діяльності. Проте, для проведення серйозних проектів потрібно зібрати в одному місці і в єдиній формі опису повну інформацію про діяльність всіх підрозділів та їх робітників.

Вирішити поставлені завдання дозволяє інтегроване середовище моделювання та аналізу ARIS Toolset [1].

Інструментальне середовище ARIS представляє собою реалізовану методологію формалізації інформації про діяльність підприємства і представленню її у вигляді інформаційних моделей, зручних для розуміння та аналізу. Створювані за допомогою даного інструментарію моделі відображають існуючу ситуацію на підприємстві. Ступінь деталізації залежить від цілей проекту, який здійснюється. Побудова моделі за даною методологією можуть бути використанні для аналізу та випрацювані різного роду рішень по реорганізації підприємства, впровадженню інформаційної системи підтримки діяльності підприємства.

Програмний продукт реалізує принципи структурного аналізу, коли підприємство розглядається у вигляді складної системи, яка складається з різних структурних компонент, які мають різного роду взаємозв'язки між собою. Таким чином, дані інструментальні засоби дозволяють визначити та відобразити в моделях основні компоненти підприємства, діючих процесів, інформації, а також представити взаємозв'язки між цими компонентами.

Моделі, які створюються в середовищі ARIS представляють собою сукупність знань про систему управління на підприємстві і включають організаційну структуру підприємства, склад та структура документів, послідовність виконання процесів та ін. На відміну від інших інструментальних засобів, ARIS зберігає всю інформацію в єдиному репозиторії, що забезпечує цілісність та несуперечливість процесу аналізу та моделювання [2].

Серед великої кількості можливих методів опису процесів в ARIS будемо користуватися нотацією eEPC (event-driven process chain) – метод опису процесів, який використовується в ERP- системі SAP R/3 та ін. На рисунку 1 показано використання різних об'єктів моделювання ARIS eEPC при створенні моделі бізнес процесів.

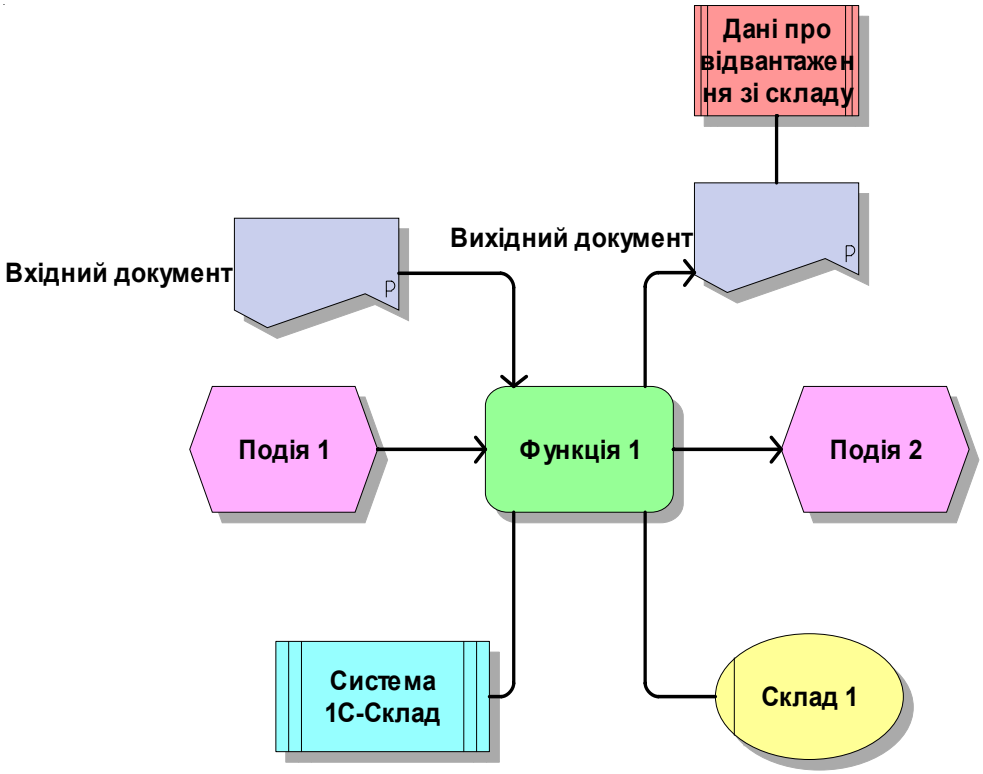



Рис. 1. Фрагмент інформаційної моделі бізнес-процесу із взаємозв'язками

Оскільки, машинобудівне підприємство, як правило, має багато структурних підрозділів, за допомогою яких здійснюється прийом, узгодження та реалізація замовлення, тому на різних стадіях життєвого циклу виробу формується велика кількість проектно-виробничих даних. Звідси виникає вимога до інструментальних засобів ARIS щодо коректної передачі даних та їх достовірності і повноти відображення [3]. Обмін даними з іншими системами може бути здійснена наступним чином:

1. Передача інформації через буфер обміну Windows. Можлива передача графічних об'єктів до інших систем, при цьому графіка представляється у векторному вигляді і може бути відредагована. Значення показників з ARIS можуть бути передані як у табличному вигляді, так і формі простого тексту.
2. Експорт/імпорт даних у форматі HTML за допомогою модуля Web Link.
3. Прямий доступ до сховища ARIS через інтерфейс API.
4. Використання спеціальних інтерфейсів для обміну даними з системами CASE-класу.
5. Спеціальні модулі-інтерфейси, які забезпечують інтеграцію з такими системами, як: Microsoft Project, ER/win, Designer/2000, Rational Rose, IEF, PowerDesigner, System Engineer, IBM Flowmark (клас workflow), Staffware та багатьма іншими.

Моделі процесів можна надавати у користування іншим співробітникам підприємства, які приймають участь у формуванні проектно-виробничої документації. Цю можливість забезпечує багатокористувацькі та мережні функції ARIS. Причому немає необхідності у створенні спеціальних інструкцій для персоналу. Відповідні права доступу гарантують користувачам санкціонований доступ до потрібних частин баз даних ARIS.

Розглянемо звичайну ситуацію для машинобудівного підприємства, за якої замовлення надходить на підприємство і реалізується наявними на підприємстві ресурсами. Повний життєвий цикл замовлення включає в себе цілу низку операцій та дій, які виконують більшість існуючих на підприємстві підрозділів.

На рисунку 2 показано узагальнену модель бізнес-процесу у вигляді послідовно виконуваних робіт (процедур, функцій) по прийому, узгодженню та виготовленню виробів по замовленню.

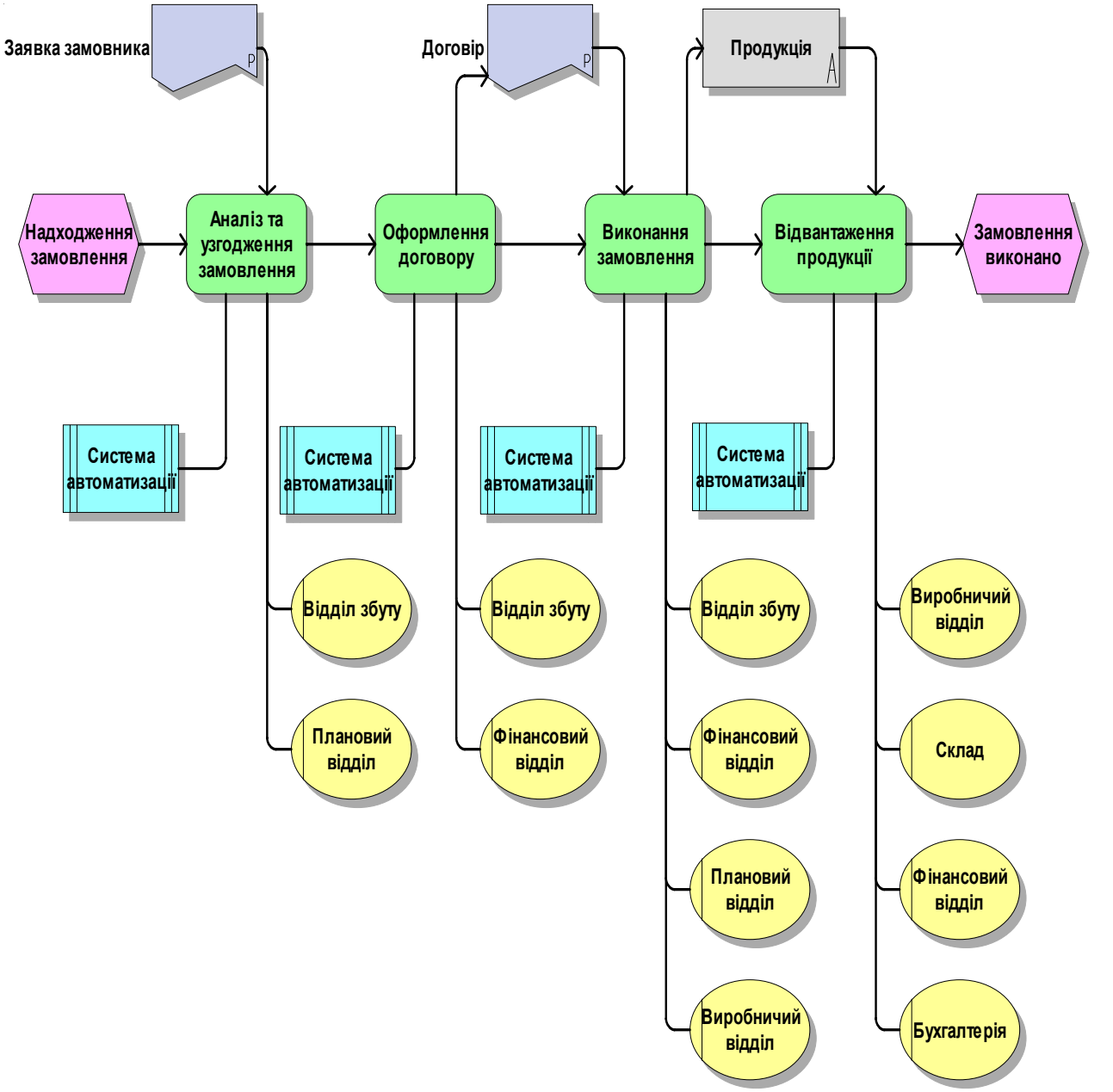



Рис. 2. Узагальнена модель життєвого циклу замовлення, яке надходить на підприємство

Кожна функція ініційована подією, тобто функція «Аналіз та узгодження замовлення» ініційована подією «Надходження замовлення». Для виконання даної функції потрібна повна інформація як по замовленню, так і по наявним на підприємстві ресурсам, за допомогою яких може бути здійснена реалізація замовлення. Кожна процедура може бути виконана впровадженими на підприємстві системами автоматизації та персоналом, який в даному випадку несе відповідальність за свою роботу на даному етапі життєвого циклу замовлення. Виконання кожної з процедур супроводжується формуванням проектно-виробничих даних, які в свою чергу використовуються на наступному етапі виконання замовлення.

На рисунку 2 достатньо спрощено показано етапи життєвого циклу замовлення, тому що кожна з функцій включає в себе цілий комплекс робіт по організації, плануванню та реалізації замовлення. Розглянемо більш детально згадувану вище функцію «Аналіз та узгодження замовлення». На цьому етапі відбувається глибокий аналіз самого замовлення та всієї технічної документації переданої замовником, якщо така є. Основною інформацією

даної стадії опрацювання замовлення є визначення технічної спроможності та доцільності виготовлення заданої кількості виробів у визначенні строки, проте, цей процес є неможливий без інформаційного забезпечення.

Інформаційна підтримка здійснюється шляхом доступу до даних зі всіх відділів та підрозділів підприємства. Це, насамперед, дані про існуючі матеріальні ресурси та запаси на складах (виробничі дані), планове завантаження обладнання (планові дані), інформаційні ресурси про технологічні процеси (проектні дані), дані про існуючі договори, замовників та виробничу програму (комерційні дані). Якщо комерційні дані це інформація, яка найменше змінюється, то виробничі дані, планові та проектні постійно змінюються і найбільше впливають на результат оцінки та аналізу замовлення. Тому визначимо основні задачі при оцінці та аналізу замовлення, відповіді на які в подальшому і формуватимуть проектно-виробничі дані:

а) Визначити розмірні, фізико-механічні характеристики, за допомогою яких в подальшому визначити тип обладнання та оснастку.

б) Визначити чи можливо виготовити вироби із відповідними характеристиками на основі запропонованого до впровадження або існуючого технологічного процесу.

в) Визначити виробничі площі та обладнання, за допомогою яких можливо виготовити вироби із заданими характеристиками.

г) Визначити параметри технологічного процесу.

д) Визначити характеристики технологічної оснастки та обладнання для виготовлення виробів із заданими параметрами.

е) Визначити потребу в сировині та матеріалах.

ж) Визначити необхідні трудові ресурси та трудові норми.

Об’єднання даних про вироби, ресурси та процеси дозволить значно пришвидшити темпи оцінки на етапі ведення переговорів із замовником, спроможності та доцільності випуску даного виробу. Інформаційне забезпечення задач прийняття проектних рішень про вибір технологічного обладнання дає можливість паралельного проектування самого виробу та технологічної оснастки у відповідності до вибраного обладнання, що скорочує строки технічної підготовки виробництва.

## Висновки

Інтегроване середовище функціонального моделювання та аналізу інструментальними засобами ARIS eEPC значно розширює можливості розробленої автором підсистеми інформаційної підтримки прийняття рішень по оцінці замовлень, які надходять на підприємство, забезпечує корегування оперативно-календарних планів з урахуванням оптимального завантаження виробничого обладнання та структур маршрутних технологічних процесів. Підсистема реалізована засобами PDM-системи ENOVIA-SmarTeam V5R18, та може за допомогою API-інтерфейсів використовуватися ERP та CRM системами, а також автоматизованими системами технічної підготовки виробництва.

## Список літератури

1. *Роб Дэвис и Эрик Брабендер* «BPM для начинающих. Моделирование бизнеса с ARIS Design Platform». \ Пер с англ., 2008. — 436 с.

2. *Август-Вильгельм Шеер* «Моделирование бизнес-процессов». Пер с англ., 2000. — 175 с.

3. *Ильин В.В.* Моделирование бизнес-процессов. Практическое использование ARIS 2006 , Williams , 176с.

УДК: 005.311.2:004.94

*А.І. Мужик, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ІНТЕГРАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРОННИМИ РЕСУРСАМИ

*В статті описуються механізми та технології розробки та впровадження систем управління електронними ресурсами як основи для побудови системи організації інтеграційної взаємодії для різнорідних інформаційних автоматизованих систем підприємства.*

В наш час на багатьох підприємствах існує велика кількість розрізнених інформаційних автоматизованих систем (ІАС), які були поступово придбані або розроблені в процесі роботи підприємства. Це обумовлено тим, що не існує єдиної системи яка б задовольняла усім функціональним потребам фахівців. Негативну роль тут відіграє принцип „best of bread", коли організація намагається вибрати найкращий продукт в своєму класі [1]. В результаті такого підходу утворюється не єдине інтегроване інформаційне середовище ІАС, а лише набір розрізнених інформаційних систем. Ці ІАС мають різний функціонал, логіку роботи, архітектуру та формати зберігання даних. Така ситуація призводить до виникнення цілого ряду проблем, таких як багаторазове дублювання інформації, низької надійності зберігання та невисокої швидкості роботи з даними, а також складності забезпечення цілісності та достовірності даних. Для вирішення перерахованих проблем необхідно розробити систему, яка буде являтись перехідною ланкою при об'єднанні ІАС в єдиному інформаційному середовищі. Найбільша ефективність такого об'єднання досягається в тому випадку, якщо ці системи будуть підтримувати декілька рівнів інтеграції.

Проведений аналіз показав, що можна виділити декілька рівнів інтеграції ІАС [1, 2]:

— інтеграція ІАС — основана на об'єднанні даних або функцій однієї ІАС з іншою, завдяки чому забезпечується інтеграція, близька до реального часу;
— інтеграція даних — основана на ідентифікації та формалізації зберігання даних з метою їх подальшого сумісного використання різними ІАС;
— інтеграція на основі стандартів — базується на використанні стандартних форматів представлення та обміну даними (XML, CORBA, EJB, COM);
— інтеграція платформ — основана на використанні процесів та інструментів, за допомогою яких різні ІАС можуть здійснювати безпечний та оптимальний обмін інформацією (.NET, J2EE).

Разом з тим, вважаємо можливим ввести ще один рівень інтеграції — інтеграцію прикладних процесів, який оснований на визначенні, реалізації та управлінні процесами обміну інформацією між різними ІАС. Під прикладним процесом розуміється такий процес, який виконує обробку інформації для реалізації логіки взаємодії сутностей предметної області та являється джерелом або споживачем інформації яка циркулює в ІАС.

Важливим є також використання наступних принципів інтеграції [1].

— Інформаційно-орієнтований — оснований на використанні однієї інформації двома та більше системами. При цьому для надання можливості роботи зі своєю інформацією в кожній системі присутній набір відкритих сервісів. Даний принцип реалізується на рівні інтеграції ІАС.

— Сервісно-орієнтований — оснований на стандартизованому описанні формату передачі даних. При цьому інформація зберігається в єдиній базі даних та присутні набір сервісів для роботи з цією базою даних. Даний принцип реалізується на рівнях інтеграції даних, платформ та на рівні використання стандартів інтеграції.

— Процесно-орієнтований — оснований на можливості підключення до внутрішніх прикладних процесів кожної ІАС таким чином, щоб не просто використовувати їх функції, а породжувати новий прикладний процес, який би пов'язав ці ІАС.

Жодний з представлених рівнів та принципів інтеграції не є універсальним, і не існує загального способу вирішення задачі інтеграції ІАС. Тому максимальна ефективність досягається в тому випадку, якщо інтеграція виконується на основі системи middleware і забезпечуються всі три принципи інтеграції. В якості такої платформи пропонується використовувати систему управління електронними ресурсами (СУЕР), яка володіє рядом додаткових властивостей та здійснює інформаційне забезпечення трьох вищезазначених принципів.

При побудові системи важливим є точне визначення понять, так як термінологічні неточності можуть вплинути на повноту реалізації визначеного функціоналу.

В модель СУЕР введено наступні поняття об'єктно-орієнтованого підходу:

— об'єкт — сутність з визначеними властивостями;
— метадані (атрибути) — елемент, який описує властивості об'єкта;
— клас — множина об'єктів з однорідними властивостями, які мають однакові метадані та семантику описання;
— відношення — семантичний зв'язок між об'єктами.

Для описання об'єктів та їх відношень доцільно використати модель RDF (Resource Description Framework), яку було розроблено консорціумом W3C спеціально для описання електронних ресурсів. Для зручності роботи зі схожими об'єктами введено поняття групи об'єктів — множини об'єктів, пов'язаних відношеннями визначеного типу. Результати аналізу існуючих рівнів та принципів інтеграції дозволили ввести поняття інтеграції ІАС — об'єднання інформаційних автоматизованих систем, яке пов'язує множину ресурсів та їх відношень в даних системах. Під інформаційною автоматизованою системою розуміється система, яка реалізує конкретну інформаційну модель предметної області, та забезпечує отримання, зберігання, пошук та обробку (перетворення) інформації [3].

Основним об'єктом в СУЕР являється електронний ресурс (ЕР). Для визначення поняття ЕР було проаналізовано вітчизняну термінологію в порівнянні з термінологією, яка використовується в міжнародних стандартах та в законодавстві закордонних країн.

На основі вищезазначеного визначимо поняття електронного ресурсу як інформаційної пари $E_i = \langle N_i, M_i \rangle$, що циркулює в СУЕР. Тут $N_i$ — наповнення ЕР; $M_i$ — метадані ЕР.

Під наповненням розуміється дані ЕР, які можуть приймати будь-який вигляд: текстовий файл, масив елементарних типів даних, набір бінарних даних або інший ЕР.

Метадані ЕР — опис ЕР, який однозначно його ідентифікує та відображає його статичні та динамічні характеристики. Структура матаданих може визначатись в рамках моделі RDF або бути побудованою на основі стандарту метаданих Дублінського ядра з врахуванням класифікації електронних документів ДСТУ 34.003-90. Вона складається з набору елементів даних, необхідних для описання ЕР. При цьому для кожного класу ЕР частина метаданих є обов'язковою. Наприклад, для метаданих електронного документу розроблено стандартний XML-формат їх представлення, а для описання об'єкту „Особа" використовується довільний формат представлення згідно моделі RDF (рис. 1).

Головна відмінність RDF від XML та інших технологій обробки інформації — представлення даних в розподілених системах. Місцеположення та спосіб доставки даних однозначно визначаються форматом URI (Uniform Resource Identifier).

При побудові моделі інтеграції ІАС використовується підхід, оснований на використанні СУЕР в якості системи middleware для інтеграції інформаційних систем. СУЕР забезпечує підтримку трьох основних принципів інтеграції.

Структура системи організації інтеграційної взаємодії представлена на рис. 2.

В моделі інформаційно-орієнтованої інтеграції використовується єдина база даних для зберігання інформації усіх діючих ІАС. Для цього в СУЕР передбачається інтерфейс, який

надає можливість управління даними СУЕР в залежності від призначених іншим ІАС прав. Також в СУЕР передбачений механізм, який дає змогу використовувати інтерфейси інших ІАС для доступу до їх даних.

```
<rdf:RDF xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
         xmlns:ns="http://www.example.org/#">
   <ns:Osoba rdf:about="http://www.example.org/#Petrov">
      <ns:hasFio rdf:resource="http://www.example.org/#fio" />
      <ns:hasPass>
         <rdf:Description rdf:about="http://www.example.org/#passport">
             <ns:hasSerial rdf:resource="http://www.example.org/#serial" />
             <ns:hasNum rdf:resource="http://www.example.org/#num" />
             <ns:hasDate rdf:resource="http://www.example.org/#date" />
             <ns:hasDesc rdf:resource="http://www.example.org/#description" />
         </rdf:Description>
      </ns:hasPass>
   </ns:Osoba>
</rdf:RDF>
```

Рис. 1. Приклад запису метаданих згідно моделі RDF

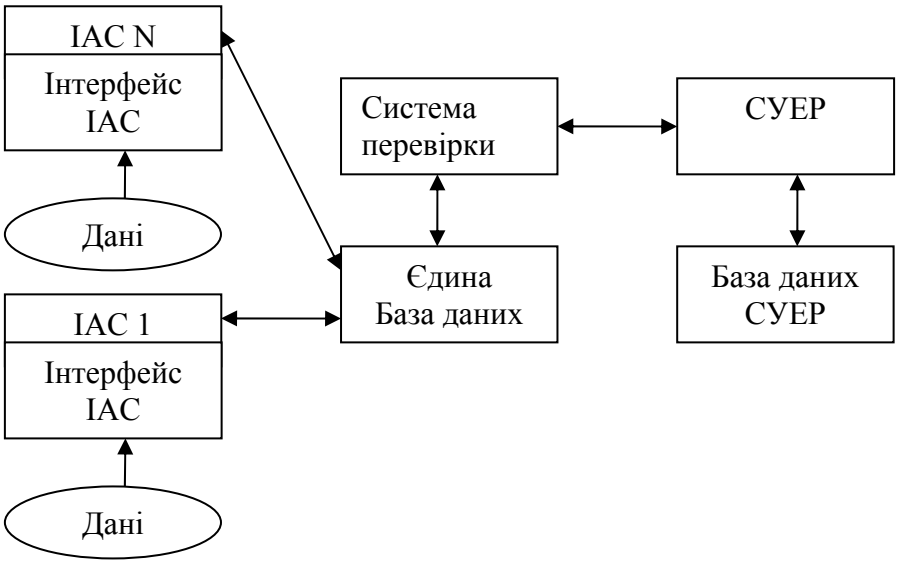



Рис. 2. Структура системи організації інтеграційної взаємодії

В основу моделі сервісно-орієнтованої інтеграції закладено поняття електронного ресурсу як об'єкта, який зберігає інформацію в структурованому або слабко структурованому вигляді зі стандартизованим описанням. Це дозволяє використовувати ЕР як контейнер даних довільного типу та розміру. Крім того, СУЕР має набір сервісів, які надають можливість кожній зареєстрованій ІАС працювати з цими ЕР.

В основу моделі процесно-орієнтованої інтеграції закладено поняття прикладного процесу, функціональних блоків управління та доступу до таких процесів. Інтеграція проводиться шляхом створення типових прикладних процесів, які здійснюють зв'язок між прикладними процесами різних ІАС. Передбачено створення індивідуальних прикладних процесів, здатних в ході виконання забезпечувати передачу даних в кожну ІАС або отримання даних з неї. Для ефективної реалізації інтеграції в СУЕР розроблено механізм створення прикладних процесів на основі структури їх XML-описання.

Для обробки XML можна використовувати різні мови програмування, наприклад, Java з використанням низькорівневих прикладних інтерфейсів (API), таких як SAX або DOM, але найбільш зручним є використання мови XSLT (eXtensible Stylesheet Language – Transformation). Однією з переваг цієї мови є її схожість з продукційними правилами та відносна схожість з інструкціями на звичайній мові, а головне ця мова дозволяє

трансформувати структуру XML документів в інший формат. Загальна схема підсистеми трансформації електронних ресурсів СУЕР представлення на рис. 3. Для трансформації ЕР необхідно правила XSLT застосувати до цього ресурсу. Трансформація виконується за допомогою XSLT-ядра. В результаті трансформації генерується необхідне представлення ЕР (серіалізація ЕР).

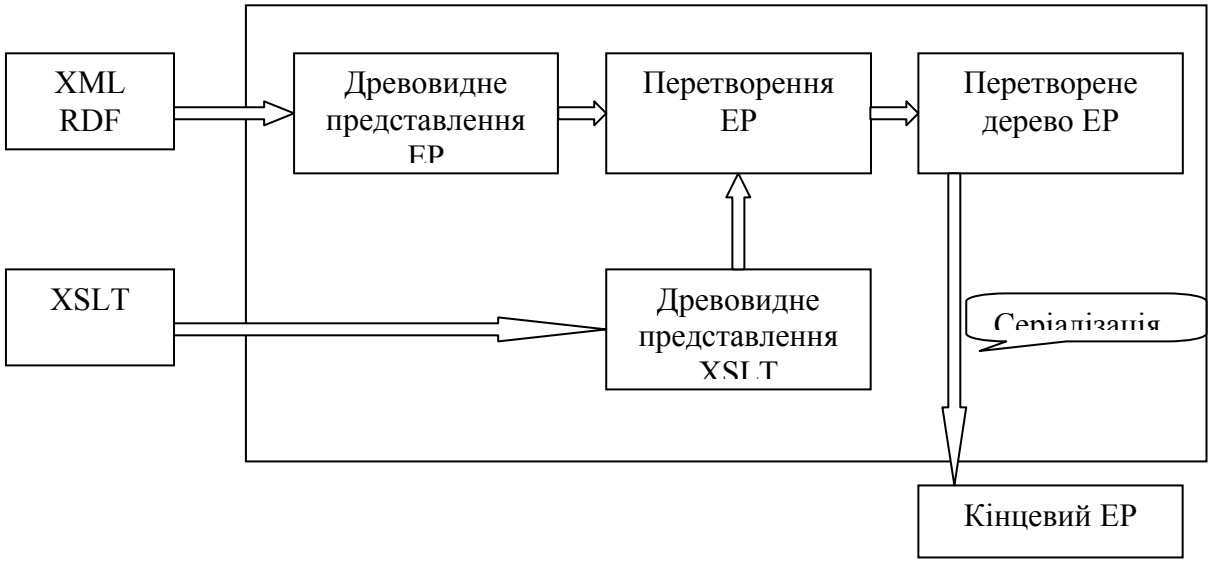



Рис. 3. Підсистема трансформації системи управління електронними ресурсами

Для отримання необхідних даних інформаційна система передає в СУЕР відповідний набір мета даних. Для кожного елемента даних, що входить до складу ЕР заповнюється додатковий набір метаданих. Інформаційна модель додаткових мета даних є стандартною для всіх ЕР, що знаходяться під управлінням СУЕР, тому, знаючи структуру матаданих, зовнішня ІАС може легко отримати необхідні їй дані (наприклад, списки осіб та відповідні їм записи з баз даних) та опрацювати їх у відповідності з закладеними функціями.

## Висновки

Таким чином, описані механізми дозволяють СУЕР виступити в ролі об'єднуючої ланки, забезпечити інтеграцію різнорідних систем в єдиному інформаційному просторі, як за рахунок можливості реєстрації довільних електронних ресурсів, які зберігаються у зовнішніх інформаційних системах, в СУЕР з наступною їх участю в бізнес-процесах, так і за рахунок надання можливості обміну будь-якими даними по різним протоколам.

Результатом роботи є структура системи управління електронними ресурсами як основа для розробки системи інтеграційної взаємодії на основі моделі RDF. Для вибору архітектури системи необхідно провести подальші дослідження з метою розробки алгоритму вибору оптимальної архітектури.

## Список літератури

*1. Галкин Г.М.* Мифы и парадигмы интеграции приложений // Аналитика и исследования [Електронний ресурс]. – Режим доступу : URL : http://www.iemag.ru/?ID=495937. – Назва з екрану.

*2. Стрелкова Е.* Интеграция даннях предприятия // Открытые системы. 2005 № 4. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : URL : http://www.osp.ru/os/2005/04/182921. – Назва з екрану.

*3. ЗАфанасьев К.Е.* Проблемы и типовые решения создания информационной инфраструктуры регіонального образовательного комплекса / Афанасьєв К.Е., Гудов А.М., Захаров М.В.; — Кемерово: Изд-во КемГУ, 2006. 19 с.

УДК 005.311.2:004.94

*Л.А. Смирнова, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# УПРАВЛІННЯ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЕКТУВАННЯМ В ІНТЕГРОВАНОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

*Доповідь присвячена питанню управління конструкторсько-технологічним проектуванням на основі інтегрованого використання 3D – моделювання. Автор визначає роль 3D – моделей у розв'язанні комплексу задач розробки операційного технологічного процесу і формування керуючої програми для обладнання з числовим програмним керуванням.*

Автоматизація проектних та виробничих робіт промислових підприємств забезпечила значне зростання продуктивності та якості виконання цих робіт. Використання таких інтегрованих автоматизованих систем, як CAD/CAM/CAE, ERP та PDM стало вже звичним і вкрай необхідним для більшості українських підприємств. Разом з тим, до даного часу проблемною є автоматизація управління процесами проектування, планування та ін. Ця задача є актуальною не тільки для управління документообігом, а і для управління даними самих проектно-виробничих процесів підприємств з метою, наприклад, забезпечення необхідної точності обробки, необхідного завантаження обладнання та ін.

Конструкторсько-технологічною й організаційно-виробничою інформацією необхідно управляти в єдиному інформаційному середовищі технологічної підготовки виробництва (ТПВ). В роботах зарубіжних та вітчизняних вчених немає методології побудови автоматизованої системи технологічної підготовки виробництва (АСТПВ) розширених підприємств. Отже, розроблення та впровадження розширених підприємств потребує вдосконалення методів побудови АСТПВ та методів управління ТПВ.

Інформаційним об'єктом, що генерується в АСТПВ і передається на верстат із числовим програмним керуванням, є керуюча програма (КП). При цьому формування КП є функцією CAM – системи (чи CAD/CAM), яка є однією з підсистем АСТПВ.

Розробка операційного технологічного процесу у CAD/CAM – системі полягає у використанні 3D – моделі деталі як вихідної інформації. CAD система автоматизує працю інженера – конструктора і дозволяє вирішувати завдання проектування виробів і оформлення технічної документації за допомогою персонального комп'ютера. У сучасних CAM – системах та інших спеціальних засобах автоматизації підготовки КП розв'язуються такі задачі, як автоматизація розрахунку траєкторій інструменту, переміщення інструменту для обробки на верстатах з числовим програмним керуванням, контроль точності обробки, контроль зіткнень у системі ВПІД (верстат-пристрій-інструмент-деталь) і т. ін. (рис. 1). Важливим для автоматизації є також управління проектуванням операційного технологічного процесу (ОТП), яке може здійснюватися в АСТПВ за допомогою інструментальних засобів PDM-системи. Розв'язання цих задач ґрунтується на інтегрованому використанні 3D – моделей деталі, заготовки, різального та допоміжного інструменту, пристроїв, верстата з числовим програмним керуванням. Не дивлячись на те, що сьогодні існує не один десяток CAM – систем, і всі вони відрізняються інтерфейсом і можливостями, порядок роботи з ними приблизно однаковий. Щоб визначити роль 3D – моделей у розв'язанні всього комплексу задач розробки ОТП і формування КП для обладнання з числовим програмним керуванням, У загальній схемі роботи з CAD/CAM системою можна виділити наступні етапи:

1. У CAD – системі створюється електронне креслення або 3D - модель деталі, яке імпортується в CAM – систему. Технолог-програміст визначає оброблювальні поверхні на моделі деталі і геометричні елементи, які необхідно обробити (лінії, поверхні, грані, ребра 3D – моделей і так далі) в інтегрованому режимі роботи з CAM – системою. Сучасні CAM – системи дозволяють контролювати переміщення інструменту не тільки щодо робочих елементів, але і щодо інших геометричних елементів.

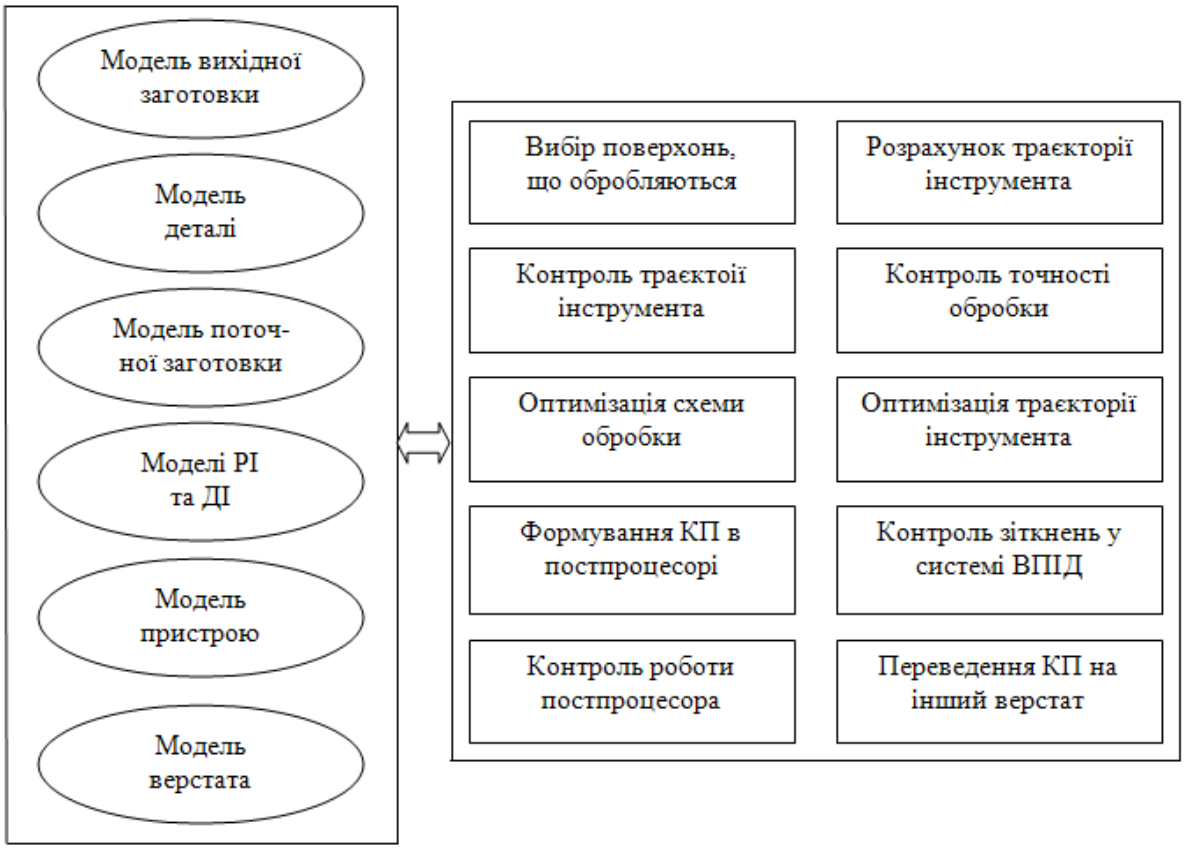



Рис. 1. Використання 3D – моделей під час розв'язання задач розробки ОТП і формування КП для обладнання з числовим програмним керуванням

Можна вибрати контрольовані елементи, яких інструмент не повинен стосуватися ні за яких умов. Деякі CAM – системи вимагають визначення геометрії заготівки вже на початковому етапі проектування обробки. Це означає, що система «бачить» заготівку і розраховує траєкторії виходячи з дійсного припуска. Заготівка може бути визначена декількома способами: у вигляді циліндра, у вигляді паралелепіпеда, довільної форми. Вибираючи геометричні елементи, що підлягають обробці технолог-програміст повинен враховувати положення деталі і заготівки щодо нульової крапки.

2. На другому етапі роботи з CAM – системою технолог-програміст вибирає стратегію і параметри обробки, призначає ріжучий інструмент і режими різання. Сучасна система проводить розрахунки траєкторій переміщення інструменту, і зазвичай має солідний набір стратегій, що дозволяє виконати обробку однієї і тієї ж деталі різними способами.

3. В даний час будь-яка CAM – система має функції для перевірки правильності створених траєкторій руху інструменту. Функція бекплота (Backplot) дозволяє програмісту відстежувати переміщення ріжучого інструменту, яка дозволяє технологу оцінити правильність траєкторії руху інструменту. При цьому він може спостерігати за траєкторією центру інструменту і самим інструментом прямо на 3D моделі. Бекплот використовується для попередньої перевірки розрахованих траєкторій і настройки технологічних параметрів операції. Остаточна перевірка точності обробки зазвичай здійснюється за допомогою верифікації (візуальна перевірка). Інструменти верифікації надають програмісту прекрасні можливості для наочної перевірки траєкторії руху інструменту, для оцінки якості і загальної технології виготовлення деталі. Основний сенс верифікації полягає в демонстрації процесу видалення матеріалу заготівки і можливості подивитися на остаточний результат роботи КП – модель виготовленої деталі. Отриману «віртуальну» деталь можна розглянути з різних сторін. Можна побачити, чи всі елементи виконані правильно, і навіть розгледіти гребінці на матеріалі, що залишилися від інструменту. Верифікація може бути твердотільною або

растровою. Якщо на цьому етапі виявляються які-небудь помилки, то програмист може легко їх виправити, повернувшись до попереднього етапу.

4. Оптимізація траєкторії інструмента. Використання 3D – моделей поточного стану заготовки безпосередньо в процесі формування траєкторії інструменту створює передумови для оптимізації цієї траєкторії. Такі рішення, прийнятті в CAD/CAM, реалізують такі алгоритми оптимізації, як можливість попереднього реалістичного перегляду результатів обробки до початку розрахунку траєкторії інструменту і бекплота, а саме, контроль можливих зіткнень інструменту із заготовкою на прискорених (холостих) переміщеннях, видалення непотрібних холостих переміщень із процесу обробки, контроль навантаження на інструмент та ін.

5. Фінальним продуктом CAM – системи є код керуючої програми. Цей код формується за допомогою постпроцесора, який форматує КП під вимоги конкретного верстата і системи числового програмного керування. Постпроцесор – програма, яка перетворить файл траєкторії руху інструменту і технологічних команд (проміжний файл), сформований CAD/CAM системою, у файл КП відповідно до вимог конкретного комплексу «верстат – СЧПК». CAM – система генерує проміжний файл, що містить інформацію про траєкторію, кута повороту інструменту і узагальнені команди управління верстатом. Далі в роботу вступає постпроцесор. Він перетворить цей проміжний файл в програму обробки в строгій відповідності з форматом програмування конкретного верстата з числовим програмним керуванням. Така технологія дозволяє програмісту під час проектування обробки в CAD/CAM – системі не замислюватися про те, на якій конкретно верстат потрапить КП і який буде її формат. Йому необхідно лише вибрати постпроцесор, відповідний певному верстату з числовим програмним керуванням, і той візьме на себе всю роботу із створення програми обробки певного формату. Сьогодні найбільш ефективним і простим вирішенням проблем постпроцесування на підприємстві є використання універсального постпроцесора. Універсальні постпроцесори дозволяють працювати з багатьма відомими системами CAD/CAM і одночасно не залежати від них. На відміну від класичних постпроцесорів, які працюють з проміжним файлом тільки «рідної» системи, універсальні постпроцесори здатні «переробляти» CL-файли різних CAM систем. Інтуїтивно-зрозумілий графічний інтерфейс дозволяє будувати наочну кінематичну схему верстата і задавати типові параметри системи числового програмного керування, та отримати могутній і універсальний засіб для вирішення проблем сумісності будь-якого устаткування з будь-якою CAD/CAM системою.

6. Перетворення КП для виконання обробки на іншому верстаті. Ця задача виникає тоді, коли з різних причин (поломка верстата, його зайнятість) обробку деталі потрібно перенести на верстата із ЧПК іншої моделі. Якщо при цьому комп’ютерне представлення ОТП у CAM-системі не збережено, то нову КП не можна отримати завдяки використанню відповідного постпроцесора. Завдання можна вирішити за допомогою спеціальної програми-конвертора, який перетворить КП з існуючого формату в потрібний.

Принципову схему системи управління процесом проектування ОТП і формування КП для обладнання з числовим програмним керуванням наведено на рис. 2.

Функціонування блоку контролю точності обробки здійснюється відповідно до механізму верифікації сучасних CAD/CAM – систем, в основу якого покладено порівняння вихідної (конструкторської) моделі деталі з моделлю деталі,яку отримано в результаті обробки. Оцінкою точності є величина відхилень параметрів деталі після обробки від її номінальних параметрів.

Отже, 3D – моделі всіх елементів технологічної системи є як джерелом інформації під час розв’язання широкого спектра задач розробки ОТП і формування КП, так і тими базовими елементами, на яких будуються алгоритми технологічних проектних процедур.

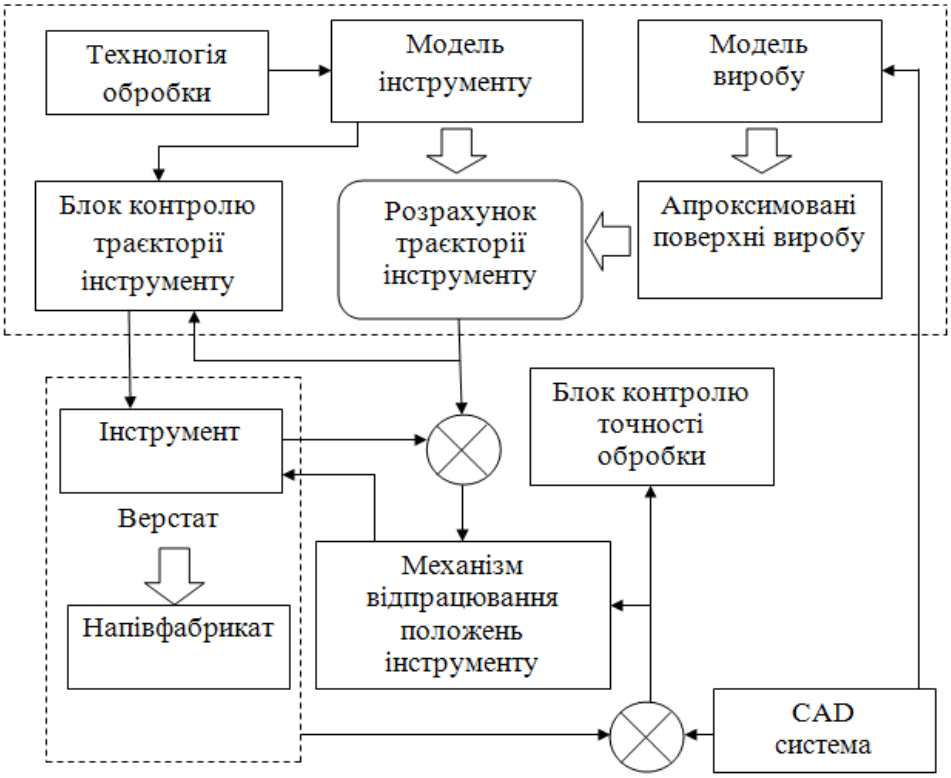



Рис.2. Принципова схема системи управління процесом проектування ОТП та процесом обробки виробу на верстаті з числовим програмним керуванням

## Висновки

Практика впровадження розглянутих вище систем на підприємствах машинобудування доводить високу ефективність методів розробки операційного технологічного процесу і КП для обладнання з числовим програмним керуванням на основі використання 3D – моделей. При цьому істотно скорочуються терміни розробки, поліпшується якість розроблюваних операційних технологічних процесів і КП, підвищується ефективність використання обладнання з числовим програмним керуванням. Однак недостатня інтеграція розглянутих засобів призводить до дублювання функцій, необхідності повторних робіт, зайвих витрат підприємства на придбання програмного забезпечення, необхідності освоєння різних засобів для вирішення однотипних завдань. Тому комплексне дослідження методів використання 3D – моделей для вирішення завдань проектування операційного технологічного процесу і КП може стати точкою відліку для подальшої інформаційної та структурної інтеграції CAD/CAM – систем і спеціальних засобів автоматизації програмування й управління обладнання із числовим програмним керуванням.

## Список літератури

*1. Павленко П.М.* Автоматизовані системи технологічної підготовки розширених виробництв. Методи побудови та управління. Монографія. – К: Книжкове видавництво НАУ, 2005. – 280 с.

*2. Ловыгин А.А., Васильев А.В., Кривцов С.Ю.* Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM система. – М.: «ЭльфИПР», 2006. – 286 с.

УДК 621.391:621.314

*А.В. Толбатов*
*(Сумський державний університет, Україна)*

# ІНФОРМАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ГАЗОТУРБІННИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

*В доповіді розглянуті функціональні задачі інформаційного моніторингу газотурбінних електростанцій та підвищення ефективності функціонування енергогенеруючих об'єктів*

Розвиток теоретичних і методологічних основ та інструментальних засобів створення і використання інформаційних технологій, розроблення методів і моделей прийняття рішень в автоматизованих системах управління технологічних та енергетичних комплексів є однією з найважливіших науково-технічних проблем. Одним з напрямів розвитку енергетики в Україні є створення і експлуатація газотурбінних електростанцій (ГТЕ). Більшість інформаційних функцій ГТЕ відносяться до категорії інформаційного забезпечення процедур моніторингу. Якісне виконання функцій моніторингу надзвичайно важливо для реалізації всіх функцій управління процесом функціонування ГТЕ. Тому розвиток теорії і методології моніторингу процесів функціонування ГТЕ є актуальною науково-прикладною задачею.

Актуальність доповіді обумовлена важливістю і актуальністю для енергетики України задачі підвищення ефективності функціонування енергогенеруючих об'єктив, зокрема ГТЕ, шляхом побудови і впровадження інтелектуальних інформаційних технологій створення новітніх систем моніторингу і енергоефективного управління процесами функціонування цих об'єктів. Під процедурами інформаційного моніторингу функціонування газотурбінної електростанції розуміються відслідкування динаміки (виникнення, розвитку, змін) статистичних характеристик сигналів на основі їх вимірювань, а саме при:

аналізі функціонування ГТЕ і визначенні основних характеристик електростанції при різних режимах її роботи;

розробці математичних моделей сигналів і перешкод в інформаційних каналах ГТЕ, базуючись на фізичних явищах і процесах їх формування;

імітаційному моделюванні (на ЕОМ) при створенні відповідних баз даних;

обробці результатів випробувань окремих вузлів, модулів електростанції;

статистичній обробці даних вимірювань з метою оцінки ефективності управління при роботі електростанції в різних режимах.

Функціональні задачі інформаційного моніторингу ГТЕ відображає структурна схема рис. 1.

В системі інформаційного моніторингу проводяться дослідження комплексних операцій обробки вимірювальної (первинної) інформації спостереження за поточними станом і режимами роботи технологічних підсистем та ГТЕ в цілому, формування поточної та інтегровної інформації про функціонування ГТЕ, формування рекомендованих керуючих дій.

Розглянемо типові задачі аналізу функціонування інформаційних трактів динамічних систем:

$Z[\cdot]$ – оператор, який визначений на просторі випадкових функцій $\left\{\xi_j(\omega,t),\omega\in\Omega,t\in T,j=\overline{1,n}\right\}$ і описує функціонування аналізуємого тракту системи, $\Omega$ – множина подій (повідомлень, результатів виміру) $\omega$, $T$ – часовий інтервал спостереження;

$\xi(\omega,t),\omega\in\Omega,t\in T$ – вхідний випадковий процес (вхідна дія). У системі моніторингу ці процеси відображують характеристики (звичайно числові) поточного стану технічних елементів ГТЕ або процесів (технічних, технологічних), що підлягають спостереженню (вимірам);

$\zeta(\omega,t),\omega\in\Omega,t\in T$ – вихідний випадковий процес як відгук оператора $Z[\cdot]$ при вхідній дії $\xi(\omega,t)$. У системі моніторингу ці процеси мають місце на прийомних кінцях інформаційних

каналів. Вони відображують характеристики поточного стану технічних елементів ГТЕ або процесів і підлягають статистичній обробці з метою виділення достовірної інформації та перешкод, а також для формування інтегрованих відомостей про функціонування ГТЕ та її підсистем.

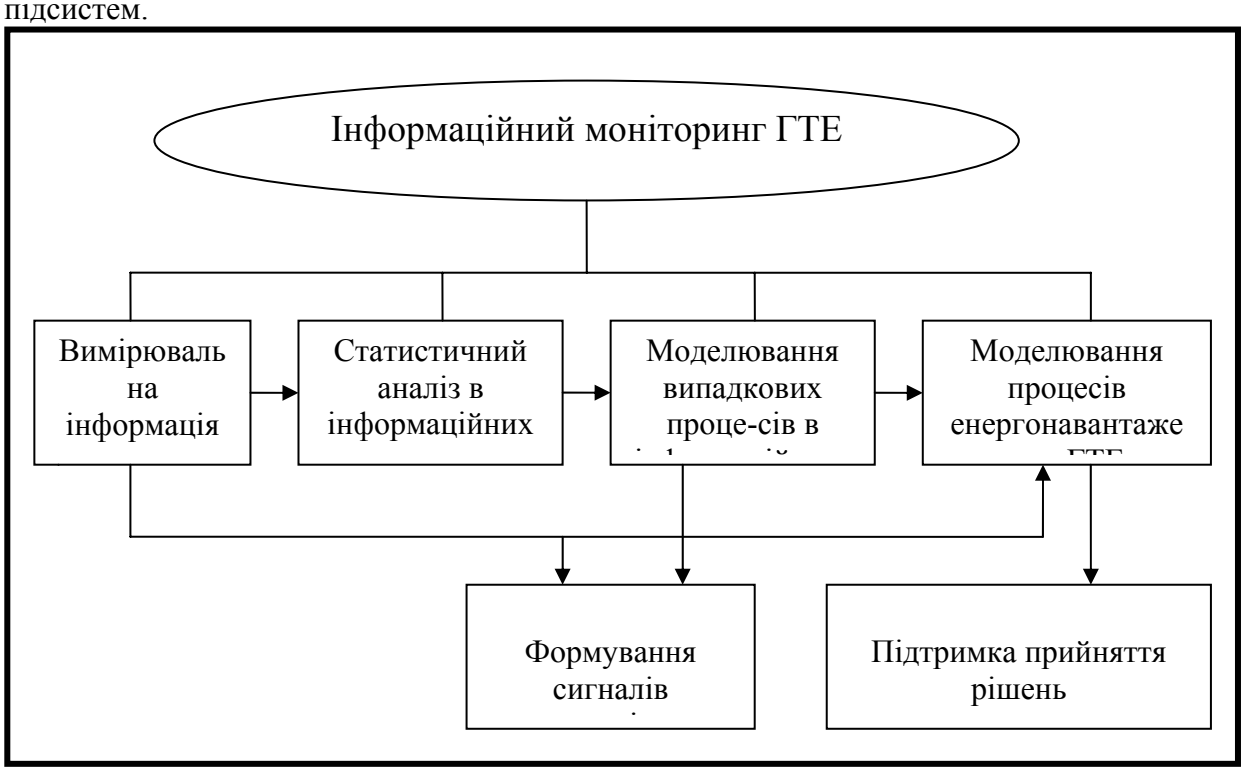



Рис. 1 – Функціональні задачі інформаційного моніторингу ГТЕ

Виділяють наступні три задачі аналізу функціонування інформаційного каналу системи:

*Пряма задача* – задані $\xi(\omega,t)$ і $Z[\cdot]$. Потрібно визначити $\zeta(\omega,t)$;

*Обернена задача* – задані $\zeta(\omega,t)$ і $Z[\cdot]$. Потрібно визначити $\xi(\omega,t)$;

*Задача ідентифікації, або задача "чорної скриньки"* – задані $\xi(\omega,t)$ і $\zeta(\omega,t)$. Потрібно визначити $Z[\cdot]$.

Природно, що кожна з вказаних вище задач потребує відповідної конкретизації для її розв'язку.

1. Методи аналізу лінійних перетворень випадкових процесів. Сучасний підхід передбачає аналіз лінійних перетворень випадкових процесів у рамках кореляційної теорії. Визначаються перші два моменти досліджуваного випадкового процесу, а саме математичне сподівання – перший початковий момент процесу і кореляційна функція – другий центральний сумісний момент процесу. Для таких процесів, базуючись на визначених перших двох моментних функціях, можна отримати й вищі моментні функції.

На сьогодні можна стверджувати, що повний опис відгуку $\zeta(\omega,t)$ лінійного оператора $Z[\cdot]$ для любого випадкового процесу $\xi(\omega,t)$ не отримано, тобто не визначені скінченовимірні функції розподілу або характеристичні функції досліджуваного відгуку.

2. Методи аналізу нелінійних перетворень випадкових процесів. Задачі нелінійних перетворень випадкових процесів у порівнянні з лінійними розв'язуються значно складніше, як правило, у рамках кореляційної теорії. Значна кількість таких задач пов'язана у першу чергу із специфікою нелінійності, тому для кожного обмеженого класу задач використовуються свої методи. Це методи: кореляційних функцій; розкладання відгуків нелінійних операторів в ортогональні ряди, ортогональні стохастичні функціонали, ряди Вольтера та інші.

3. Метод стохастичних інтегральних зображень. Базуючись на результатах огляду публікацій, в якості основного методу досліджень для розв'язку задач аналізу процесів перетворень сигналів слід обрати метод стохастичних інтегральних зображень. Цей метод по суті є узагальненням таких відомих методів як методи білого шуму, формуючих фільтрів, канонічних розкладів, породжуючого процесу [1, 2]. Застосування методу стохастичних інтегральних зображень дає можливість:

описати широкий клас сигналів і перешкод, які діють при функціонуванні інформаційних каналів ГТЕ, на базі теорії лінійних випадкових процесів, в тому числі гаусівських, нестаціонарних, з пуассонівською компонентою, як з неперервним, так і дискретним часом [1];

отримати повний в ймовірнісному розумінні опис математичних моделей досліджуваних сигналів і перешкод у вигляді скінченовимірної послідовності характеристичних функцій лінійного випадкового процесу;

проводити повний у ймовірнісному розумінні аналіз лінійних перетворень діючих сигналів і перешкод при інформаційному моніторингу в каналах ГТЕ як аналіз лінійних випадкових процесів, які є класом процесів, замкнутих відносно лінійних перетворень;

у рамках кореляційної теорії робити аналіз нелінійних перетворень діючих сигналів на основі використання ортогональних стохастичних функціоналів, в тому числі в негаусівському і нестаціонарному випадках;

з метою отримання статистичних оцінок характеристик досліджуваних сигналів і перешкод проводити широке коло імітаційних моделюючих експериментів на ЕОМ на основі використання основних положень теорії лінійних випадкових процесів і методу стохастичних інтегральних зображень випадкових процесів.

## Висновки

Отже, в інформаційних каналах системи моніторингу здійснюється передача сигналів з перешкодами, які утворюють простір випадкових функцій. Математичною моделлю аналізуємого інформаційного каналу є оператор перетворень $Z[\cdot]$, визначений на просторі випадкових функцій $\left\{\xi_j(\omega,t),\omega\in\Omega,t\in T,j=\overline{1,n}\right\}$ – вхідних випадкових процесів. Відгуком оператора $Z[\cdot]$ на вхідну дію $\xi(\omega,t)$ є вихідний випадковий процес $\zeta(\omega,t),\omega\in\Omega,t\in T$. У системі інформаційного моніторингу здійснюється статистична обробка вихідних процесів $\zeta(\omega,t)$ з метою виділення достовірної інформації, а також для формування інтегрованих відомостей про функціонування ГТЕ та її підсистем. Сучасний підхід передбачає аналіз лінійних і нелінійних перетворень випадкових процесів у рамках кореляційної теорії. На сьогодні повний опис відгуку $\zeta(\omega,t)$ лінійного оператора $Z[\cdot]$ для любого випадкового процесу $\xi(\omega,t)$ не отримано, тобто не визначені скінченовимірні функції розподілу або характеристичні функції досліджуваного відгуку. В якості основного методу досліджень для розв'язку задач аналізу процесів перетворень сигналів слід обрати метод стохастичних інтегральних зображень, що дасть можливість описати широкий клас сигналів і перешкод, які діють при функціонуванні інформаційних каналів ГТЕ.

## Список літератури

*1. Нечипорук В.В. Толбатов А.В.* Математична модель перешкод при роботі АСУ газотурбінної електростанції // Вісник Сумського державного університету. – 2003.- №11(57). – С. 24-31.

*2. Толбатов А.В., Черв'яков В.Д., Щербак Т.Л.* Стохастична ритмічна модель навантаження енергогенеруючих установок // Вісник національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ "ХПІ" – 2005. –№57. – С. 104-112.

УДК 005.311.2:004.94

*В.Ю. Кудряков, м.н.с.*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ПРОДУКТИВНОСТІ ОБЛАДНАННЯ ПІДПРИЄМСТВА ЗАСОБАМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ.

*В доповіді розглянуті вимоги до інформаційної автоматизованої системи управління технічною експлуатацією, впровадження якої дозволить різко підвищити ефективність виробництва та капіталізацію промислових підприємств .*

Вітчизняні промислові підприємства в час сучасної кризи знаходяться у важкому положенні: високий рівень зносу основних фондів, брак або відсутність інвестицій для його відновлення, низька ефективність виробництва, застарілі технології, брак висококваліфікованих фахівців. Найважче доводиться підприємствам, що займаються наукоємним виробництвом,. Це зв'язано і з високою вартістю устаткування, і з серйозними вимогами до кваліфікації персоналу, і з сильною конкуренцією з боку зарубіжних підприємств. Така ситуація робить актуальним питання підвищення ефективності виробництва і забезпечення конкурентоспроможності підприємств на внутрішньому і зовнішньому ринках. Для вирішення цих проблем останнім часом все частіше використовують методи реінжинірингу бізнес-процесів підприємства. Правильно проведений реінжиніринг бізнес-процесів дозволяє на десятки відсотків збільшити ефективність роботи промислових підприємств, але часто проекти реінжинірингу не досягають запланованих результатів із-за браку оборотних коштів і інвестицій, що безпосередньо пов'язане з капіталізацією підприємства. Розглянемо можливості вирішення цих проблем, виходячи з досвіду розвинених країн та можливостей сучасних інформаційних технологій.

Капіталізація промислового підприємства - кількісна характеристика ефективності його використання. Капіталізація характеризує не стільки сам актив як річ, скільки актив, який працює. Вартість активу можна представити як множення вартості затребуваного продукту, вироблюваного активом в одиницю часу, на передбачуваний час його функціонування. Вартість вітчизняних матеріальних активів порівняно з їх зарубіжними аналогами дуже низька. У багатьох машинобудівних виробництв ринкова вартість нижче в сотні разів або взагалі близька до нуля. Ці активи потрібно модернізувати і замінювати тому, що закінчується їх життєвий цикл. Замінювати застарілі активи бажано на більш ефективніші. Але для вирішення проблеми низької вартості активів важливо, щоб модернізовані активи належали до якісно нового типу, що піддається оцифровці. Цифрові виробничі активи дозволяють точно встановити, скільки і яких ресурсів вони споживають на вході, скільки продуктів і послуг видають на виході. І найголовніше, цифрові якості активів забезпечують прогнозування динаміки їх продуктивності. Тільки тоді стає можливим залучення інвестицій на модернізаційні проекти.

Проект реінжинірингу для підвищення капіталізації підприємства повинен пов'язувати як мінімум три різноякісні проектні рівні:

- на рівні ***виробничих технологій*** необхідно за рахунок часткової, обмеженої модернізації або заміни активів додати їм додаткову цифрову якість;
- на рівні ***інформаційних технологій*** необхідно провести таку обробку цих цифрових даних, щоб забезпечити моніторинг і прогноз динаміки продуктивності наших активів;
- на рівні ***фінансових технологій*** необхідно підставити отриману функцію продуктивності активів у формулу капіталізації. Тобто потрібно конвертувати уточнений прогноз продуктивності активів в інвестиційний проект і сконструювати систему фінансових

потоків, завдяки яким можна повернутися на рівень виробничих технологій і продовжити в наростаючих об'ємах модернізацію і заміну виробничих активів.

Отримати інвестиції під проект модернізації підприємства можливо тільки у випадку, якщо цей проект підкоряється жорстким стандартам фінансових технологій, таким, що потенційний інвестор зможе чітко порахувати, скільки часу буде потрібно для повернення кредиту і яким чином це буде зроблено. Для того, щоб зробити прогнозну оцінку капіталізації, необхідно перш за все оцифрувати продуктивність виробничого фонду і побудувати очікувану динаміку її зміни. Потрібно перетворити заміну кожної одиниці устаткування на привабливий інвестиційний проект з конкретними параметрами і термінами повернення засобів. Для збільшення терміну інвестицій, що привертаються, необхідний прогноз капіталізації кожного активу, заснований на максимально точній оцінці його робочого ресурсу, що залишається, і прогнозі динаміки його продуктивності. В розвинених країнах світу для складання таких прогнозів використовуються системи типу EAM (Enterprise Asset Management - управління основними фондами підприємства, дозволяє скоротити простої устаткування, витрати на техобслуговуванні, ремонті і матеріально-технічному постачанні.).

Таким чином, проект реінжинірингу необхідно розділити на декілька етапів. Перший етап - найкоротший, він вимагає відносно невеликих засобів і полягає в оптимізації функціонування активу. Оптимізація досягається за рахунок установки спеціальної автоматики і програмного забезпечення, які дозволяють частково оцифрувати актив. В результаті накопичується і узагальнюється інформація про особливості його функціонування. Інформаційний портрет активу дозволяє, поліпшивши регулювання, досягти виграшу в продуктивності на 2-3%. Другий етап - перехід від планово-запобіжних, типових ремонтів до адресних, налаштованих саме на даний актив. Для цього розробляється або отримується спеціальне програмне забезпечення [1]. За рахунок цього скорочується час простою в ремонтах і можливий приріст продуктивності вже на 10-12%. Це дозволяє ще наростити дохід, напрацювати кредитну історію, збільшити ступінь оцифрування активу. Тоді на третьому етапі стає можливо, збільшивши капіталізацію активу, привернути засоби на проект його модернізації і повної заміни.

Друга проблема промислових підприємств в тому, що активи недовантажені. Для того, щоб максимально завантажити активи, необхідно вийти за рамки підприємства, сконструювати ланцюжки, схеми, мережі виробництва нових продуктів і послуг, нової вартості, в яких актив після цього повинен бути вбудований, щоб його повністю завантажити. Це означає, що більшість ресурсів, які потрібні для реалізації цього ланцюжка, знаходяться поза підприємством: у системі суспільних потреб, кадрових інститутах, в мережі постачальників, в транспортній інфраструктурі, організації суспільної безпеки, органах стандартизації, мережах зв'язку і тому подібне

Діяльність активу, або засоби виробництва, можна розбити на деякі групи (декомпозувати). По-перше, щоб знати, як він поводитиметься далі, потрібно розуміти, що він є, його технічні характеристики, параметри. По-друге, потрібно розуміти режими, в яких він працював, які події з ним відбувалися і що є причиною цих подій. Під подіями маються на увазі різного роду поломки, зупинки, невидача штатних параметрів вгору. Всі ці відомості фіксуються в ремонтних формулярах, дефектних відомостях. Для кожної групи активів складається докладний план експлуатації на підставі технічних характеристик заводу-виробника і історії роботи кожної одиниці, що, за статистикою, дає скорочення витрат на технічне обслуговування від двох до чотирьох відсотків.

По-третє, потрібно враховувати так зване оточення активу, де він знаходиться. Одне і те ж устаткування, виріб в різних ланцюжках виробничого процесу по-різному впливає на фондовіддачу. Необхідно враховувати всі заходи, пов'язані з технікою безпеки: потрібно виконати певні процедури при ремонті, у ряді випадків повинні бути певним чином підготовлені робочі. Всі перераховані групи параметрів потрібно знати і в зручному для себе вигляді мати перед очима для того, щоб прогнозувати вироблення активу найближчими

роками. Для управління активами згідно приведеній методиці необхідно збирати і враховувати велику кількість даних - по напрацюванню, простоям, динаміці технічного стану активів, витратам матеріальних і фінансових ресурсів на забезпечення експлуатації, на проведення капітальних ремонтів і так далі. Збір цих даних ручному режимі, в паперовій формі не представляється можливим. Використання первинних засобів автоматизації, таких як електронні таблиці Excel, не дозволяє організувати збір інформації від декількох джерел. Як правило, першоджерела необхідних даних знаходяться в різних підрозділах підприємства, територіально віддалених від головного офісу. Тому процеси збору і обробки інформації можуть бути організовані тільки засобами інтегрованої автоматизованої системи управління технічною експлуатацією (ІАСУ ТЕ), що забезпечує єдиний інформаційний простір для всіх учасників ТЄ, незалежно від місця їх розташування, що підтримує зручну систему діагностики технічних параметрів виробничого активу і що має систему управління для контролю всіх параметрів активів (Рис.1).

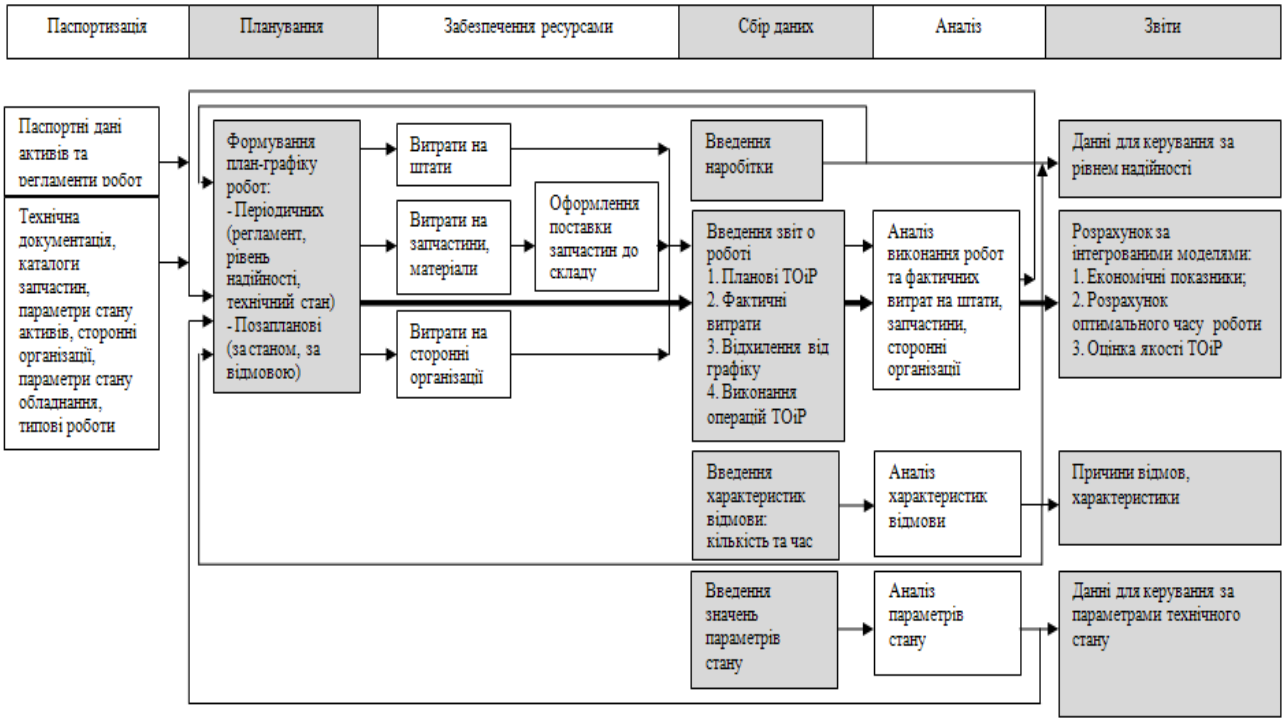



Рис.1. Функціональна схема інтегрованої автоматизованої системи управління технічною експлуатацією

На підставі комп'ютерного моделювання в такій ІАСУ ТЕ з'являється можливість співвідносити витрати, які вимагає той або інший актив, з доходами, які він може провести, що дозволить співвіднести їх і з фондовіддачею нових засобів виробництва, які з'являються сьогодні на ринку [2]. Якщо параметри нових активів вигідніші (низька вартість експлуатації, краща продуктивність, велика фондовіддача активу по його технічних характеристиках), тоді з'являється можливість складати бізнес-план інвестиційного проекту по заміні устаткування, під який можливо привертати грошові кошти, або скласти аналогічний бізнес-план на ремонт устаткування, якщо в даному випадку відремонтувати актив вигідно, ніж замінити. Склавши інформаційний портрет кожного активу, можна перемістити його убік недообслуговування або переобслуговування, залежно від його місця в технологічному ланцюжку. Управляючи цими моментами, можна знову-таки активніше управляти вартістю витрат на ремонт і технічне обслуговування. Управління активами проводиться з метою отримання заданих показників їх функціонування з урахуванням умов експлуатації і системи забезпечення працездатності. Показники можуть бути надійностними (інтенсивність відмов, коефіцієнт готовності) і техніко-економічними (об'єм випущеної

продукції, витрати, прибуток, рентабельність). Оптимальний термін служби активу може бути визначений по мінімуму питомих витрат, що доводяться на машино-часи роботи, максимуму питомого прибутку, заданому рівню рентабельності. Моделі визначення термінів служби по мінімуму питомих витрат і максимуму питомого прибутку (оптимальні значення приблизно співпадають) доцільно застосовувати у разі наявності у експлуатуючої організації засобів для оновлення активів. Модель мінімуму рівня рентабельності застосовна для підприємств, що відчувають дефіцит засобів для модернізації активів [3].

Таким чином, ІАСУ повинна містити: програмні модулі, здійснюючи планування і облік заходів забезпечення працездатності активів, розрахунок показників відповідно до методики, оптимізацію бізнес-процесів, у тому числі і визначення терміну служби; електронний каталог запчастин, бази даних постачальників продукції і послуг, замовників, персоналу, ринку техніки і так далі. Основою для функціонування ІАСУ ТЕ є бази даних, що містять інформацію по запчастинах і матеріалах кожної одиниці активу, видах техобслуговування і ремонтів, наявному ремонтному устаткуванні, технічній і ремонтній документації і так далі. Оскільки до кожного об'єкту технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) підключені всі регламентні роботи по ньому і необхідні для них ресурси, то плани майбутніх робіт і потреба в запчастинах і матеріалах повинні формуватися в ІАСУ автоматично. На основі накопичуваних в ІАСУ ТЕ даних і з метою реалізації описаної вище методики, в ІАСУ ТЕ повинні формуватися аналітичні форми, що відображають підсумки, а також прогноз характеристик технічної експлуатації за заданий період часу, в заданому підрозділі, по певному виду техніки і так далі На основі експлуатаційних даних в ІАСУ ТЕ повинні розраховуватися також надійностні показники для кожної одиниці активу з використанням даних, що характеризують експлуатацію саме цієї одиниці. До інших завдань ІАСУ ТЕ віднесемо оптимізацію структури виробничих активів, контролю і підвищення якості технічного обслуговування і ремонту, реалізації методів планування ТОіР по напрацюванню, по технічному стану, для мінімізації організаційних фінансових витрат при технічного обслуговування і ремонту і так далі [4].

## Висновки

При проведенні реінжинірингу промислових підприємств необхідно враховувати, що однією з проблем, що може стати на заваді підвищення ефективності виробництва, є низька капіталізація підприємств, зв’язана з недозавантаженням активів та складністю прогнозування динаміки їх продуктивності. Для вирішення цих проблем необхідно провести автоматизацію підприємств за допомогою спеціальної розробленої інформаційної автоматизованої системи управління технічною експлуатацією. Така ІАСУ повинна бути не тільки програмним забезпеченням або базою даних, але також гнучким інструментом для вдосконалення системи експлуатації складних технічних об'єктів і систем, ефективною як для невеликих підприємств, так і для крупних виробничих об'єднань.

## Список літератури

1. *Н.М. Капустин, П.М. Кузнецов, А.Г. Схиртладзе и др.; Под ред. Н.М. Капустина.* Автоматизация производственных процессов в машиностроении / – М.: Высш. шк., 2004. – 415 с

2. *Томашевский В.М.* Моделирование систем. / – СПб.: Изд. группа BHV, 2004. 352 с

3. *Павленко П.М.* Автоматизовані системи технологічної підготовки розширених виробництв. Методи побудови та управління: Монографія. – К.: Книжкове вид - во НАУ, 2005. – 280 с.

4. *С.В.Репин, К.В.Рулис, А.В.Зазыкин, Н.К.Ховалыг.* Разработка информационных баз техники для использования в автоматизированной системе управления техническим обслуживанием и ремонтом строительных машин. Международная электронная библиотека (электронный ресурс: interlibrary.narod.ru). - 2007. - 12 с.

УДК 531.7: 621.363.6

*П.Л. Ігнатенко,*
*І.О. Чередніков,*
*О.О. Борисов*
*(Чернігівський державний технологічний університет, Україна)*

# ПРОСТОРОВА МОДЕЛЬ ВИМІРЮВАННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

*В роботі вирішуються задача використання 3D моделювання в системі CATIA для вимірювання показників якості з урахуванням інформаційної бази цифрових потоків та їх відгук та інтерполяція в реальному часі. Наведено показники продуктивності у взаємозв'язку з якістю відображення процесу вимірювання.*

Прогрес в розвитку інформаційних технологій дозволяє вирішувати завдання реалізації передачі, обміну, зберігання, обробки і аналізу різних класів цифрових даних. Цим підтверджується актуальність проблеми збереження об'ємів ресурсів пам'яті ЕОМ і продуктивність праці, вимоги до питань раціонального використання технічних можливостей обчислювальних систем. Шорсткість поверхні являє собою графічні об'єкти, що обробляються обчислювальними системами .

Залишкові напруження, що виникають в процесі обробки, - це один з важливих чинників, що впливають на якість виробу, його експлуатаційні характеристики. Вони можуть сприяти зниженню довговічності, що несе здатності, корозійній стійкості, жорсткості, розмірній стабільності виробів.

Для отримання даних про залишкові напруження використовують різноманітні експериментальні методи – механічні і фізичні, такі, що руйнують, мало- і неруйнуючі, прямі і непрямі.

Неруйнуючий метод вимірювання залишкових напружень дозволяє отримувати інформацію оперативно з високою чутливістю і точністю при простій технології і мінімальній дії на виріб.

Метод вимірювання залишкових напружень заснований на використанні ефекту нерівномірності деформації поверхні тіла із залишковою напругою при її локальній контактній взаємодії пружнопластичності з кульовим індентором. При силовому контакті індентора, що не деформується, з плоскою поверхнею після зняття навантаження навколо відбитку формується зона випучення матеріалу.

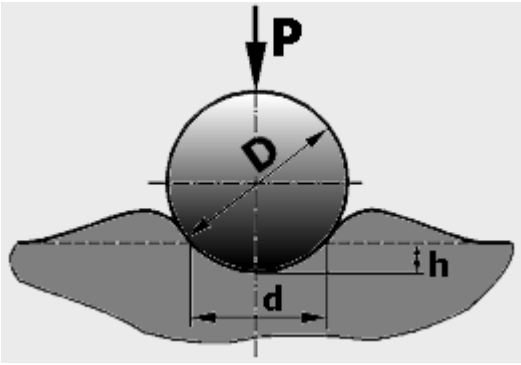



Рис. 1. Механізм взаємодії індентора з поверхнею

Залишкові напруження викликають зміни в процесі зародження і кінетиці розвитку пластичних деформацій. Пластична деформація в різних точках контуру площини контакту починається неодночасно.

Нерівномірність залишкового деформованого стану (розподіл нормальних переміщень) є реєстрованим параметром методу.

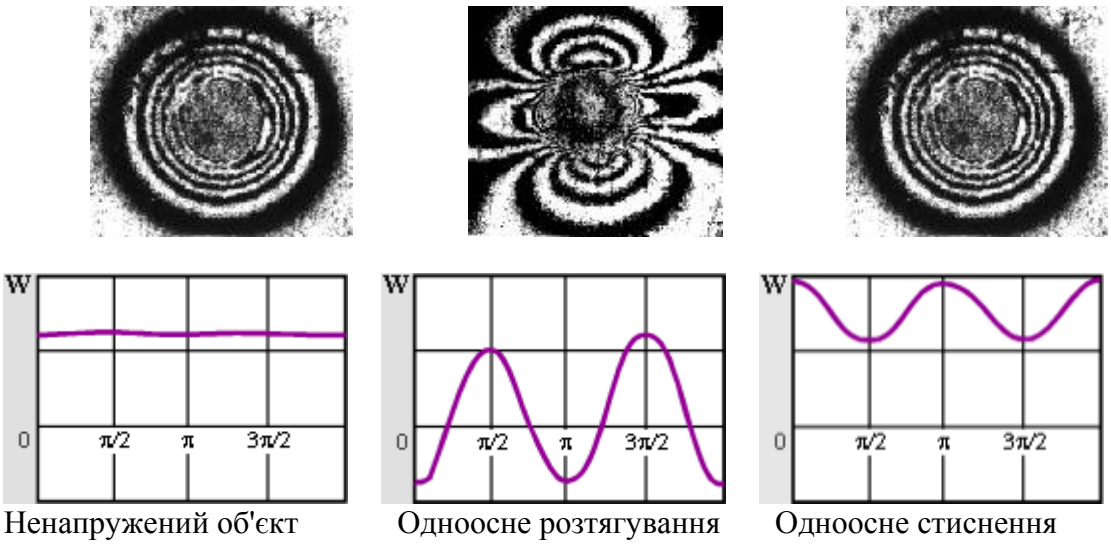



Рис. 2. Нерівномірність залишкового деформованого стану

Розподілу деформацій і переміщень в околиці відбитку характерні локальність і високі градієнти зміни.

Як спосіб вимірювання переміщень в методі використовуються голографічні інтерферометрія і спекл-фотографія з реєстрацією нормальною компоненти вектора переміщення. Вимірювальна система методу (рис.3) є голографічним інтерферометром запису голограм сфокусованого зображення. Особливістю оптичної системи є застосування цифрового способу реєстрації і відновлення інтерференційних картин. Як детектор використовується спеціалізована цифрова відеокамера з роздільною здатністю 100 лин/мм. Сигнал з відеокамери передається в пам'ять персонального комп'ютера відеограбером. Зображення зберігається у вигляді графічного файлу. Для отримання цифрового аналога інтерферограми використовується програмне забезпечення графічного редактора, за допомогою якого зображення, отримані до і після дії, накладаються за технологією «піксель в піксель» з використанням процедури віднімання.

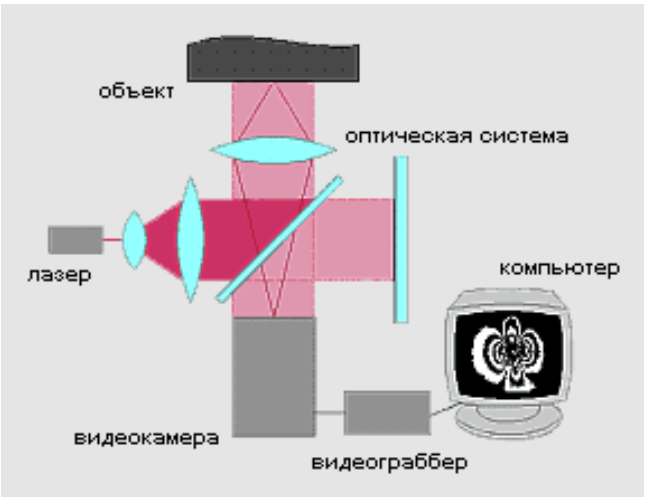
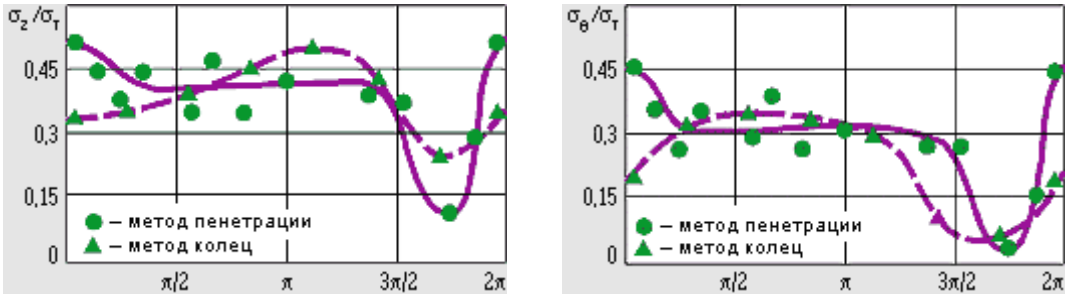



Рис. 3. Отримання цифрового аналога інтерферограми

Порівняльні випробування вимірювання напружень в стінці кільця [5], навантаженого внутрішнім тиском (контрольні методи – розрахунок, тензометрія).

| Объект исследования-труба диаметром, мм | Давление P, МПа | Напряжения, МПа | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | кольцевые, $\sigma_1$ | | | продольные, $\sigma_2$ | | |
| | | Метод пенетрации | Тензометрия | Расчет | Метод пенетрации | Тензометрия | Расчет |
| 720 | 3,2<br>0<br>5,2 | 112<br>0<br>210 | 108<br>0<br>183 | 109<br>0<br>177 | 64<br>0<br>112 | 56<br>0<br>97 | 54<br>0<br>88 |
| 530 | 4,5<br>0 | 165<br>0 | 175<br>0 | 179<br>0 | 73<br>0 | 87<br>0 | 89<br>0 |




поздовжні напруження окружні напруження

Рис. 4 Вимірювання залишкових напружень в трубі малої довжини(контрольний метод – вирізка кільця).

Інформативність: визначаються напрями головних осей напружень, величини головних напружень, знаки головних напружень в точці поверхні.

Діапазон вимірювань: не перевищує значення межі текучості матеріалу.

Чутливість вимірювань: в межах 0,05–0,1 від значення межі текучості матеріалу.

Ступінь дії на об'єкт: забезпечує відбиток індентора (сферичне поглиблення) діаметром 1,0–1,7 мм та глибиною до 0,04 мм (коефіцієнт концентрації напруги не вище 1,1).

Похибка вимірювань: не вище 5% на контрольних зразках, 10-15% на натурних виробах.

Продуктивність вимірювань визначається витратами часу при налагодженому устаткуванні на реєстрацію даних – до 1 хвилини, на обробку даних – до 2 хвилин на одну точку.

Математичний аналіз і алгоритм компактного зберігання зображень пов'язаний, по-перше, із зручністю наочності графічної інформації, і, по-друге, з тим, що тексти і всілякі програми для зберігання і передачі по мережах вимагають порівняно невеликих об'ємів пам'яті, коли як оригінал зображення розміром 640x480 може займати майже 1 Мегабайт. Особливу цінність представляє собою оптимізація цифрової обробки інформації в вимірювальних системах, що оснащуються профілографами-профілометрами та координатно-вимірювальними машинами. Таким чином, з початком застосування досягнень цифрових технологій на сучасному виробництві та питання розпізнавання і ідентифікації графічних зображень стали найважливішими для більшості інформаційно-вимірювальних систем.

Велика кількість робіт присвячена розробці та використанню алгоритмів спрощення, що забезпечують віднесення об'єкту дослідження до одного із відомих класів точності. Наявність еталонних зразків та їх функцій-прообразів дозволяє ставить у відповідність досліджувані образи поверхонь.

Досягнення в області аналізу образів привело до того положення, коли завдання про візуалізації інформації, її обробці, транспортуванню через обчислювальні мережі і аналізі стала однією з центральних серед всього різноманітності поставлених завдань компактного зберігання цифрової інформації, яка збільшується в залежності від потрібної розподільчої

здатності зображення, об'єм вимірювальної інформації яких досить великий, для образів істотно менше об'єму інформації для прообразів, при цьому така відповідність повинна бути взаємооднозначна, (принаймні для деяких основних складових, основних проекцій функцій-прообразів і їх образів).

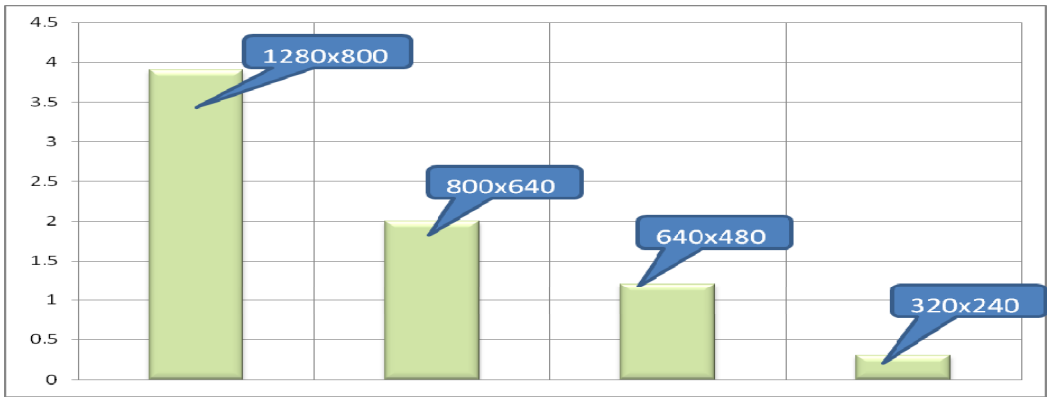



Рис.5 Залежність розміру сканованого зображення(Mb) від розподільчої здатності(dps)

На сьогоднішній день висока точність вимірювань чітко вирізняє лазерні вимірювальні пристрої з-поміж інших, що дозволяє створення цифрової 3D-моделі рельєфу поверхні та аналіз шляхом порівняння з еталонними. Неруйнуюча дія на об’єкт, в зв’язку з безконтактністю та потрібна продуктивність, що ґрунтується на високій швидкості вимірювань поверхонь деталей в приладобудуванні та машинобудуванні (до 30 секунд) при об'ємах інформації забезпечує взаємооднозначність основних складових функцій-прообразів і їх образів.

## Список літератури


1. Размерный анализ конструкций: Справочник / *С.Г. Бондаренко, О.Н. Чередников, В.П. Губий, Т.М. Игнатцев*; Под. общ. ред. канд. техн. наук С.Г. Бондаренко.– К.: Тэхника, 1989.– 150 с.
2. *Балакшин Б.С.* Теория и практика технологии машиностроения: Основы технологии машиностроения. — М.: Машиностроение, 1982.— 367 с.
3. *Бондаренко С.Г.* Розмірні розрахунки механоскладального виробництва.-К.: ІСДО, 1993.-544с.
4. *Фридлендер И. Г.* Расчеты точности машин при проектировании.— Киев; Донецк: Вища шк., 1980.— 182 с.
5. *Дубоделова О.С.*, Ивченко Т.Г. Определение остаточных напряжений в поверхност-ном слое детали при совместной обработке точением и обкатыванием. / ИНЖЕНЕР. Донецк: ДонНТУ, 2005, № 6. - С.132-135
6. *Борисов О.О.* Самонавчаєма система управління вимірювальним комплексом / Третя науково-практична конференція з міжнародною участю «Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС-2008». Тези доповідей.-Київ.-2008. — 88-90 с.

УДК 519.65+681.518.2

*В.П. Денисюк, д-р фіз.-мат. наук,*
*А.І. Бабко, О.О. Гурнік*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

## ПРО ДЕЯКІ СИСТЕМИ ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ФУНКЦІЙ

*Розглянуто системи фундаментальних поліноміальних функцій 0-го, 1-го та 2-го рівнів, наведено графіки цих функцій.*

Існує клас чисельних методів, у разі застосування яких наближений розв'язок задач для лінійних диференціальних операторів типу $Lu = f$ шукають у вигляді $u(x) = \sum_{j=1}^{N} \alpha_j \varphi_j(x)$, де $\alpha_j$ - невизначені параметри.

**Мета роботи -** побудова систем фундаментальних нормованих поліноміальних функцій $\varphi_j(x)$ нульового, першого та другого рівнів (рис. 1-14).

**Зауваження.** Тут і надалі графіки функцій наводяться при значеннях параметрів a=1, b=7, $N$ =7, $j$ =4.

Інтерполюємо функцію узагальненим многочленом за деякою системою функцій $\varphi_j(x)$ ( $j \in Z$ ), коефіцієнтами якого є значення інтерпольованої функції у вузлах деякої сітки, тобто многочленом вигляду

$$f(x) = \sum_{j=1}^{N} f(x_j)\varphi_j(x). \qquad (1)$$

Розглянемо умови, яким повинні задовольняти функції $\varphi_j(x)$ таких систем більш детально. Нехай інтерпольована функція $f(x)$ розглядається на відрізку $[a;b]$. Припустимо також, що на цьому відрізку задано деяку еквідистантну сітку

$$\Delta_N = \{x\}_{j=1}^{N}, \quad x_j = a + h(j-1), \quad h = \frac{b-a}{N-1}.$$

Позначимо через $f_j^{(k)}$ $(k = 0,1,2)$ значення самої функції та її похідних відповідно $k$-го порядку.

Системи функцій $\varphi_j(x)$, які можуть застосовуватися для подання (1), на сітках $\Delta_N$ повинні задовольняти співвідношення

$$\varphi_j(x_i) = \begin{cases} 1, & j = i; \\ 0, & j \neq i. \end{cases} \qquad (2)$$

Такі системи функцій називають фундаментальними [1].

У роботі [2] введене узагальнення означення фундаментальності (2). Системи функцій $\varphi_j(x)$, $\varphi_j(x) \in C^m$ називають фундаментальними рівня $k$, якщо вони задовольняють умови

$$\varphi_j^{(k)}(x_i) = \begin{cases} \alpha_j^{(k)}, & j = i; \\ 0, & j \neq i. \end{cases}, \quad k = 0,1,...,m; \quad m = 0,1,... \ . \qquad (3)$$

Якщо $\alpha_j^{(k)} = 1$ за всіх значень параметрів $j, k$, то фундаментальні системи функцій рівня $k$ називатимемо нормованими.

Згідно означення (3) системи фундаментальних функцій, що задовольняють умови (2), є системами фундаментальних нормованих функцій нульового рівня.

У цій роботі розглядаються системи фундаментальних нормованих поліноміальних функцій нульового, першого та другого рівнів, які складаються відповідно з поліномів першого, третього та п’ятого порядків.

**Фундаментальні функції нульового рівня** задаються рівнянням вигляду (рис.1)

$$S_j^{(0)}(x)=\begin{cases}\dfrac{x-x_{j-1}}{x_j-x_{j-1}},\ x_{j-1}\le x\le x_j;\\ \dfrac{x_{j+1}-x}{x_{j+1}-x_j},\ x_j\le x\le x_{j+1};\\ 0,\quad x<x_{j-1},\ x>x_{j+1};\end{cases}$$

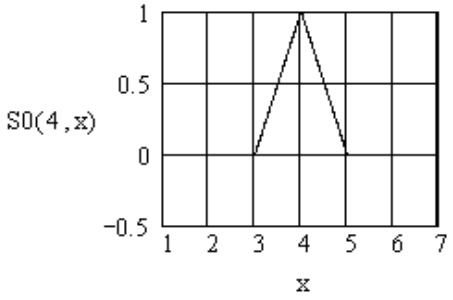



Рис.1. Функція $S_j^{(0)}(x)$ нульового рівня

Функцію $f_N^*(x)$, що інтерполює функцію $f(x)$ у вузлах сітки $\Delta_N$, можна подати у вигляді $f_N^*(x)=\sum_{j=0}^{N} f_j^{(0)}\cdot S_j^{(0)}(x)$. Функція $f_N^*(x)$ неперервна, тобто $f_N^*(x)\in C^0$.

**Фундаментальні функції першого рівня** визначаються таким чином:

$$S_j^{(0)}(x)=\begin{cases}C(j,x), & x_{j-1}\le x\le x_j;\\ (1-C(j+1,x)), & x_j\le x\le x_{j+1};\\ 0, & x<x_{j-1},\ x>x_{j+1};\end{cases}\qquad S_j^{(1)}(x)=\begin{cases}-h\cdot V(j,x)\cdot R^2(j,x), & x_{j-1}\le x\le x_j;\\ h\cdot V^2(j+1,x)\cdot R(j+1,x), & x_j\le x\le x_{j+1}.\\ 0, & x<x_{j-1},\ x>x_{j+1};\end{cases}$$

$$R(j,x)=\frac{x-x_{j-1}}{h};\ V(j,x)=1-R(j,x);\ C(j,x)=3\cdot R^2(j,x)-2\cdot R^3(j,x) \qquad (4)$$

Графіки функцій $S_j^{(0)}(x)$, $S_j^{(1)}(x)$ та їх перших похідних подано на рис. 2-5.

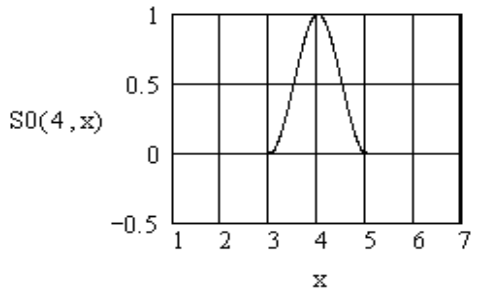



Рис.2. Функція $S_j^{(0)}(x)$ першого рівня

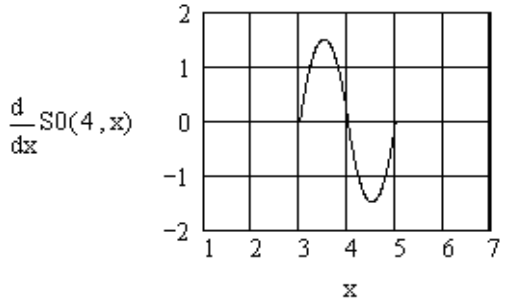



Рис.3. Похідна функції $S_j^{(0)}(x)$ першого рівня

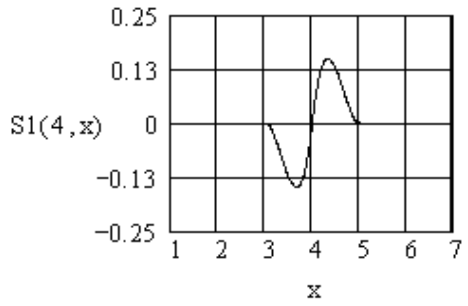



Рис.4. Функція $S_j^{(1)}(x)$ першого рівня

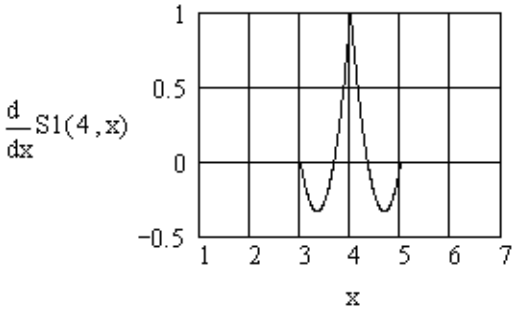



Рис.5. Похідна функції $S_j^{(1)}(x)$ першого рівня

Функцію $f_N^*(x)$, що інтерполює функцію $f(x)$ та її першу похідну у вузлах сітки $\Delta_N$, можна подати у вигляді $f_N^*(x)=\sum_{j=1}^{N} f_j^{(0)}\cdot S_j^{(0)}(x)+\sum_{j=1}^{N} f_j^{(1)}\cdot S_j^{(1)}(x)$. Функція $f_N^*(x)$ та її перша похідна є неперервними функціями, тобто $f_N^*(x)\in C^1$.

**Фундаментальні функції другого рівня** визначаються таким чином:

$$S_j^{(0)}(x)=\begin{cases} R^3(j,x)\cdot(1+3\cdot V(j,x)+6\cdot V^2(j,x)), & x_{j-1}\le x\le x_j;\\ V^3(j+1,x)\cdot(1+3\cdot R(j+1,x)+6\cdot R^2(j+1,x)), & x_j\le x\le x_{j+1};\\ 0, & x<x_{j-1},\ x>x_{j+1};\end{cases}$$

$$S_j^{(1)}(x)=\begin{cases} -h\cdot V(j,x)\cdot R^3(j,x)\cdot(1+3\cdot V(j,x)), & x_{j-1}\le x\le x_j;\\ h\cdot V^3(j+1,x)\cdot R(j+1,x)\cdot(1+3\cdot R(j+1,x)), & x_j\le x\le x_{j+1};\\ 0, & x<x_{j-1},\ x>x_{j+1};\end{cases}$$

$$S_j^{(2)}(x)=\begin{cases} (h^2/2)\cdot V^2(j,x)\cdot R^3(j,x), & x_{j-1}\le x\le x_j;\\ (h^2/2)\cdot V^3(j+1,x)\cdot R^2(j+1,x), & x_j\le x\le x_{j+1};\\ 0, & x<x_{j-1},\ x>x_{j+1};\end{cases}$$

де $R(j,x)$, $V(j,x)$, $C(j,x)$ визначаються за формулами (4) відповідно.

Графіки функцій $S_j^{(0)}(x)$, $S_j^{(1)}(x)$ $S_j^{(2)}(x)$ та їх першої та другої похідних зображено на рис. 6-14.

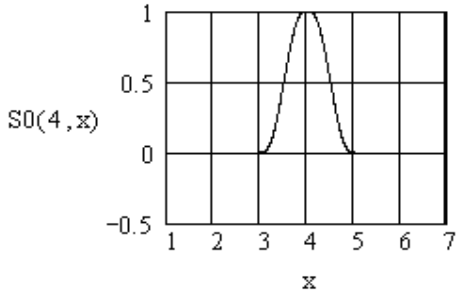



Рис.6. Функція $S_j^{(0)}(x)$ другого рівня

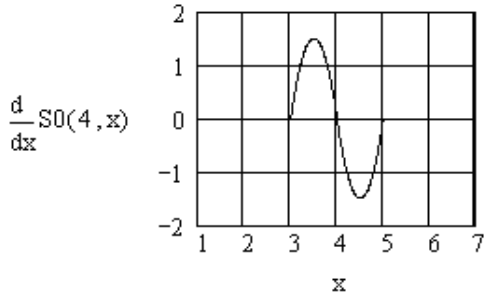
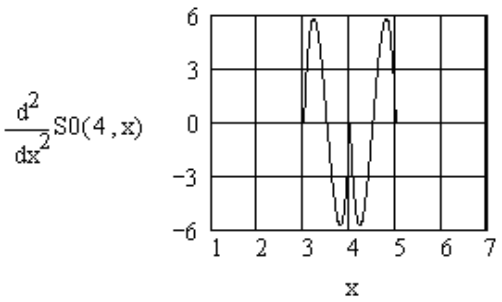



Рис.7.Похідна функції $S_j^{(0)}(x)$ другого рівня



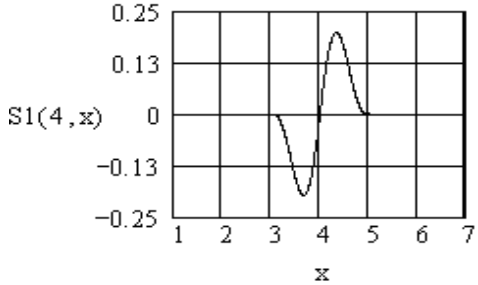



Рис.8. Друга похідна функції $S_j^{(0)}(x)$ другого рівня

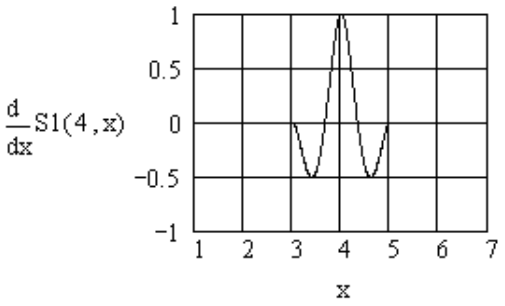



Рис.9. Функція $S_j^{(1)}(x)$ другого рівня

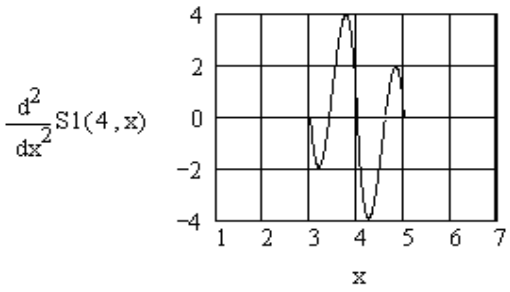



Рис.10. Похідна функції $S_j^{(1)}(x)$ другого рівня

Рис.11. Друга похідна функції $S_j^{(1)}(x)$ другого рівня

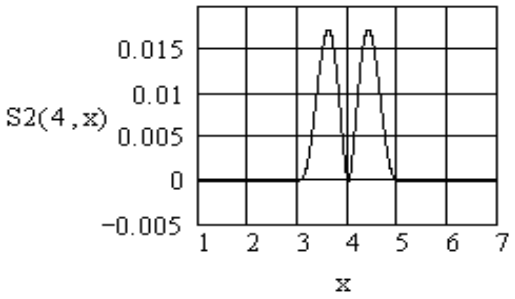



Рис.12. Функція $S_j^{(2)}(x)$ другого рівня

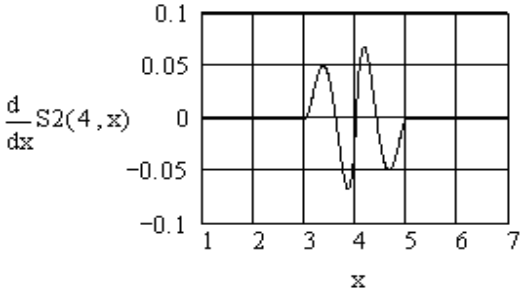



Рис.13. Похідна функції $S_j^{(2)}(x)$ другого рівня

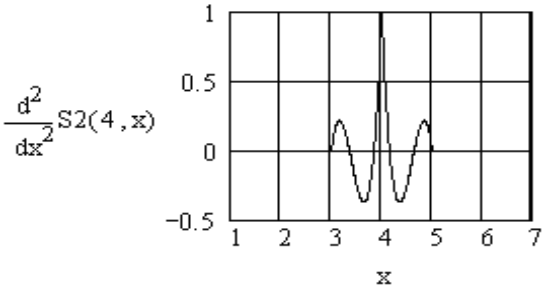



Рис.14. Друга похідна функції $S_j^{(2)}(x)$ другого рівня

Функцію $f_N^*(x)$, що інтерполює функцію $f(x)$ та її першу та другу похідні у вузлах сітки $\Delta_N$, можна подати у вигляді $f_N^*(x)=\sum_{j=1}^{N} f_j^{(0)} \cdot S_j^{(0)}(x)+\sum_{j=1}^{N} f_j^{(1)} \cdot S_j^{(1)}(x)+\sum_{j=1}^{N} f_j^{(2)} \cdot S_j^{(2)}(x)$. Функція $f_N^*(x)$ та її перша та друга похідні є неперервними функціями, тобто $f_N^*(x) \in C^2$.

**Висновки:** фундаментальні функції нульового, першого та другого рівнів, можуть застосовуватися в задачах моделювання та обробки вимірювальних сигналів.

**Список літератури**

1. *Гутер Р.С.* и др. Элементы теории функций. - М.: Физматгиз, 1963. - 244с.

2. *V.P.Denysiuk.* Fundamental function and their application. – The World Congress “Aviation in the XXI-st Century”. Kyiv, 2003.- p. 8.88-8.91.

УДК 519.65 + 681.518.2

*В.П. Денисюк, доктор фізико-математичних наук, професор,*
*О.П. Олійник, старший викладач*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ПРО ОДИН ПІДХІД ДО ЗАДАЧІ АПРОКСИМАЦІЇ ФУНКЦІЙ НА ДИСКРЕТНІЙ МНОЖИНІ ТОЧОК

Нехай $M_N$ – множина дійсних функцій, заданих на дискретній множині рівновіддалених точок $t_0, t_1, \dots, t_N$ деякого відрізка $[0;T]$. Функції $\varphi(t) \in M_N$ і $\psi(t) \in M_N$ будемо вважати тотожними, якщо $\varphi(t_j) = \psi(t_j),\ j = \overline{0,N}$. За нульовий елемент множини $M_N$ приймемо будь-яку функцію, яка приймає нульові значення у точках $t_0, t_1, \dots, t_N$. Тоді множина $M_N$ з визначеними на ній операціями додавання і множення на дійсні числа утворює лінійний простір $M_N$.

Введемо на просторі $M_N$ скалярний добуток функцій $\varphi(t) \in M_N$ і $\psi(t) \in M_N$ співвідношенням $(\varphi, \psi) = \sum_{j=0}^{N} \varphi(t_j) \cdot \psi(t_j) = \sum_{j=0}^{N} \varphi_j \cdot \psi_j$. (1)

Простір $M_N$ можна вважати векторним простором вимірності $N+1$. Тому скалярний добуток (1) нічим не відрізняється від скалярного добутку в $N+1$ - вимірному евклідовому векторному просторі і, відповідно, для нього виконуються всі аксіоми скалярного добутку.

Визначимо норму елемента $f \in M_N$: $\|f\| = (f,f)^{\frac{1}{2}} = \left[\sum_{j=0}^{N} f_j^2\right]^{\frac{1}{2}}$. (2)

Лінійний простір $M_N$ із введеним у ньому скалярним добутком (1) і нормою (2) утворює лінійний нормований простір $\theta_N$. Відстань між двома функціями в даному просторі визначимо співвідношенням $\rho(f,g)_N = \left[\sum_{j=0}^{N} (f_j - g_j)^2\right]^{\frac{1}{2}}$, яке задає метрику в просторі $\theta_N$.

Систему функцій $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_N$ називають лінійно незалежною у просторі $\theta_N$, якщо з умови $c_0 \cdot \varphi_0(t_j) + c_1 \cdot \varphi_1(t_j) + \dots + c_N \cdot \varphi_N(t_j) = 0$ випливає, що $c_0 = c_1 = \dots = c_N = 0$, і ортогональною, якщо $(\varphi_k, \varphi_n)_N = \sum_{j=0}^{N} \varphi_k(t_j) \cdot \varphi_n(t_j) = 0,\ k \neq n$.

Із загальної теорії відомо, що для будь-якої функції $f \in \theta_N$ існує елемент найкращого наближення у розумінні скалярного добутку (1), причому цей елемент є єдиним. Зауважимо, що елемент найкращого наближення у розумінні скалярного добутку (1) часто називають елементом найкращого середньоквадратичного наближення. Під терміном “єдиний елемент найкращого наближення” розуміємо множину функцій, що приймають на сітці $\Delta_N$ одні й ті ж самі значення. Ці функції, які співпадають у вузлах сітки $\Delta_N$, можуть як завгодно відрізнятися при значеннях аргументу, не співпадаючих в цих вузлах.

Нехай $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m$, $m < N$ – система лінійно незалежних функцій. Елемент найкращого середньоквадратичного наближення у просторі $\theta_N$ фукнції $f(t)$ має вигляд $\Phi_m(t) = c_0\varphi_0(t) + c_1\varphi_1(t) + \dots + c_m\varphi_m(t)$, де коефіцієнти $c_0, c_1, \dots, c_m$ визначаються із системи нормальних рівнянь, яка в свою чергу має вигляд

$$\begin{aligned}
&c_0(\varphi_0,\varphi_0)_N + c_1(\varphi_1,\varphi_0)_N + \dots + c_m(\varphi_m,\varphi_0)_N = (f,\varphi_0)_N \\
&c_0(\varphi_0,\varphi_1)_N + c_1(\varphi_1,\varphi_1)_N + \dots + c_m(\varphi_m,\varphi_1)_N = (f,\varphi_1)_N \\
&\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\
&c_0(\varphi_0,\varphi_m)_N + c_1(\varphi_1,\varphi_m)_N + \dots + c_m(\varphi_m,\varphi_m)_N = (f,\varphi_m)_N
\end{aligned}$$

Якщо ж система функцій $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m$ ортогональна, то коефіцієнти $c_0, c_1, \dots, c_m$ елемента найкращого наближення функції $f(t)$, що має вигляд

$$\Phi_m(t) = c_0\varphi_0(t) + c_1\varphi_1(t) + \dots + c_m\varphi_m(t),$$

є узагальненими коефіцієнтами Фур'є функції $f(t)$ і визначаються за формулами

$$c_k = \frac{(f,\varphi_k)}{(\varphi_k,\varphi_k)} = \frac{(f,\varphi_k)}{\|\varphi_k\|^2}, \quad k = \overline{1,m}.$$

Середньоквадратичне відхилення функції $f(t)$ від елемента найкращого наближення $\Phi_m(t)$ визначається за формулою ( теорема Парсеваля )

$$\rho^2(f,\Phi_m) = \|f\|^2 - \sum_{k=0}^{m} c_k^2\|\varphi_k\|^2 = \|f\|^2 - \sum_{k=0}^{m}\frac{(f,\varphi_k)_N^2}{\|\varphi_k\|^2}.$$

Враховуючи введене поняття норми у просторі $\theta_N$, це співвідношення можна подати у вигляді $\rho^2(f,\Phi_m) = \sum_{j=0}^{N} f_j^2 - \sum_{k=0}^{m}\left[c_k^2\sum_{j=0}^{N}\varphi_k^2(t_j)\right]$.

Якщо система ортогональних функцій $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m$ одержана в результаті ортогоналізації системи лінійно незалежних функцій $\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_m$, то елементи найкращого наближення $\Phi_m(t)$ і $\Phi_m$ співпадають у вузлах сітки і тому оцінку $\rho^2(f,\Phi_m)$ можна застосовувати і до многочлена $\Phi_m(t)$. Із повноти ортогональної системи випливає, що при $m = N$ величина $\rho^2(f,\Phi_m)$ обертається на нуль. Тому в цьому випадку елемент найкращого середньоквадратичного наближення інтерполює функцію $f(t)$ у вузлах сітки $\Delta_N$. Важливість цього висновку полягає в тому, що на його основі з'являється можливість побудови інтерполяційних наближень з використанням коефіцієнтів Фур'є ортогональної системи функцій у просторі $\theta_N$.

Розглянемо випадок, коли простір $\theta_N$ складається із періодичних з періодом $2\pi$ функцій. Нехай $\Delta_N^0 = \{t_j^0\}_{j=0}^{N}$, $t_j^0 = \frac{2\pi}{N+1}\cdot j$ – сітка, задана на відрізку $[0; 2\pi]$. Разом із сіткою $\Delta_N^0$ розглянемо і сітку $\Delta_N^1 = \{t_j^1\}_{j=0}^{N}$, $t_j^1 = \frac{\pi}{N+1}\cdot(2j+1)$. Введемо індикатор I, що приймає значення 0,1, після чого сітки $\Delta_N^0$ і $\Delta_N^1$ надалі будемо позначати через $\Delta_N^I$. При цьому $N = 2n+1$, $n = 0,1,\dots$ .

Введемо у розгляд будь-які $2\pi$-періодичні функції, множину яких позначимо через $\mathcal{R}_N^I$. Функції $\varphi(t) \in \mathcal{R}_N^I$ і $\psi(t) \in \mathcal{R}_N^I$ будемо вважати тотожними, якщо виконуються умови $\varphi(t_j^I) = \psi(t_j^I)$, $j = \overline{1,N}$, $I = 0,1$.

За нульовий елемент множини $\mathcal{R}_N^I$ приймемо будь-яку функцію цієї множини, яка приймає нульові значення у вузлах сітки $\Delta_N^1$. Операції додавання елементів множини $\mathcal{R}_N^I$ і множення їх на дійсні числа вводяться природним чином. На множині функцій $\mathcal{R}_N^I$ введемо скалярний добуток таким чином: $(\varphi,\psi)^I = \sum_{j=0}^{N}\varphi(t_j^I)\cdot\psi(t_j^I), \quad I = 0,1.$ (3)

Норму елемента $f \in \mathcal{R}_N^I$ визначимо аналогічно: $\|f\|^I = \left\{\sum_{j=0}^{N}\left[f(t_j^I)\right]^2\right\}^{1/2}$ (4)

Систему функцій $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_N(t)$ будемо називати I – ортогональною, якщо скалярний добуток будь-яких двох функцій цієї системи з різними індексами, що визначається співвідношенням (3) дорівнює нулю. Якщо при цьому норми цих функцій, визначені співвідношенням (4) дорівнюють 1, то систему функцій $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_N(t)$ будемо називати I – ортонормованою.

Множина функцій $\mathcal{R}_N^I$ із введеним на ній скалярним добутком (3) і нормою (4) утворює лінійний нормований простір, який надалі будемо позначати через $\theta_N^I$.

Виходячи із загальної теорії, можна зробити висновок, що для будь-якої функції $f \in \theta_N^1$ знайдеться елемент найкращого наближення у розумінні скалярного добутку (3), причому цей елемент буде єдиним і являє собою певну множину функцій простору $\theta_N^1$, які приймають на сітці $\Delta_N^1$ однакові значення.

Нехай $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$ − ортонормована система функцій. Розглянемо задачу знаходження елементів найкращого наближення. Якщо многочлен

$$\Phi_m^I(X) = c_0^I \cdot \varphi_0(t) + c_1^I \cdot \varphi_1(t) + \dots + c_m^I \cdot \varphi_m(t),\ m \le N,$$

є многочленом найкращого наближення для функції $f \in \theta_N^1$, то

$$\sum_{j=0}^{m} c_j^I \left(\varphi_j, \varphi_k\right)_N^I = \left(f, \varphi_k\right)_N^I, \qquad k = \overline{0,m}.$$

Враховуючи I – ортогональність і нормованість системи функцій $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_m(t)$, одержимо: $c_k^I = (f, \varphi_k^I)_N,\ k = \overline{0,m}.$ (5)

При $m = N$ елементом найкращого наближення є інтерполяційний многочлен. Якщо $m \le N$, то елементом найкращого наближення є многочлен $\Phi_m^I(t)$, про який будемо казати, що він побудований за методом найменших квадратів.

Найважливішим прикладом системи функцій, I – ортогональних у розумінні скалярного добутку (3), є система функцій (6):

$$1, \alpha_1(r,N) \cdot \Phi_1^c(r,N,X), \alpha_1(r,N) \cdot \Psi_1^s(r,N,X), \dots, \alpha_n(r,N) \cdot \Phi_n^c(r,N,X), \alpha_n(r,N) \cdot \Psi_n^s(r,N,X).$$

Враховуючи, що функції цієї системи у вузлах сітки $\Delta_N^1$ приймають значення

$$1, \cos t_j^I, \sin t_j^I, \dots, \cos nt_j^I, \sin nt_j^I, \quad j = \overline{0,N}$$

є необхідність доведення співвідношень $\sum_{j=0}^{N} \cos kt_j^I \cdot \cos mt_j^I = \begin{cases} 0, & k \neq m, \\ \dfrac{N}{2}, & k = m; \end{cases}$

$$\sum_{j=0}^{N} \sin kt_j^I \cdot \sin mt_j^I = \begin{cases} 0, & k \neq m, \\ \dfrac{N}{2}, & k = m; \end{cases} \qquad \sum_{j=0}^{N} \cos kt_j^I \cdot \sin mt_j^I = 0,$$

вірність яких легко перевіряється.

Система функцій (6) має неперервні похідні до $r-1$-го порядку. Необхідно зауважити, що найбільш поширена система тригонометричних функцій вигляду

$$1, \quad \cos t, \quad \sin t, \dots, \quad \cos nt, \quad \sin nt,$$

є частинним випадком системи (6) і може бути одержана з неї за допомогою граничного переходу по параметрах $r$ або $N$.

Враховуючи ортогональність системи функцій (6), коефіцієнти $a_k^I$, $b_k^I$ многочлена найкращого наближення за методом найменших квадратів по цій системі функцій, у відповідності з (5) знайдемо за формулами

$$a_k^I = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{n} f\left(t_j^I\right) \cdot \cos kt_j^I, \quad k = \overline{0,n};$$

$$b_k^I = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{n} f\left(t_j^I\right) \cdot \sin kt_j^I, \quad k = \overline{0,n}.$$

Отже, якщо $m = N$, то многочлен найкращого наближення $\Phi_m^I(t)$ інтерполює функцію $f(t)$ у вузлах сітки $\Delta_N^1$. Якщо ж $m < N$, то многочлен $\Phi_m^I(t)$ наближає функцію $f(t)$ у розумінні скалярного добутку, введеного співвідношенням (3).

Виділимо загальний підхід до задачі апроксимації функцій, заданих на дискретній множині точок.Обмежимося лише розглядом тригонометричного сплайна $S_{1,1}t_r(f, \Delta_N^I, t)$. Кожній функції $f \in \theta_N$ поставимо у відповідність вектор $\overline{FS_n} = \{FS_k(f,r,N,t)\}_{k=0}^{n}$, компоненти якого визначаються співвідношеннями

$$FS_k(f,r,N,t) = a_k^1(r,N)\left[a_k^* \Phi_k^c(r,N,X) + b_k^* \Psi_k^s(r,N,X)\right],$$

де $a_{kn}^{s}, b_{kn}^{s}$ -коефіцієнти інтерполяційного тригонометричного многочлена. Разом з вектором $\overline{FS_n}$ розглянемо також і вектор $\bar{P}_n = \{p_j\}_{j=0}^{n}$, компоненти якого $p_j$- дійсні числа. Розглянемо також функцію $\varphi_n(\overline{FS_n}, \bar{P}_n)$, що являє собою скалярний добуток векторів $\overline{FS_n}$ і $\bar{P}_n$, тобто функцію $\varphi_n(\overline{FS_n}, \bar{P}_n) = (\overline{FS_n}, \bar{P}_n) = \sum_{k=0}^{n} P_k FS_k(f, r, N, t)$.

В залежності від способу визначення компонент вектора $\bar{P}_n$ будемо розрізняти наступні випадки.

1. Якщо компоненти вектора $\bar{P}_n$ визначаються співвідношеннями

$$p_j = 1, \qquad j = \overline{0, n},$$

то функція $\varphi_n(\overline{FS_n}, \bar{P}_n)$ являє собою тригонометричний сплайн $S_{11}t_r(f, \Delta_N^t, t)$. У цьому випадку ми маємо задачу інтерполяції у просторі $\Theta_N$.

2. Якщо компоненти вектора $\bar{P}_n$ визначаються співвідношеннями

$$p_j = \frac{1}{(1+\mu j)^{2q}}, \qquad j = \overline{0, n},$$

то функція $\varphi_n(\overline{FS_n}, \bar{P}_n)$ являє собою один із дискретних аналогів розв'язку задачі регуляризації з параметрами $\mu$ і $q$ тригонометричного сплайну $S_{11}t_r(f, \Delta_N^t, t)$ у просторі $\Theta_N$.

3. Якщо компоненти вектора $\bar{P}_n$ визначаються співвідношеннями

$$p_j = \begin{cases} 1, & 0 \le j \le n < N, \\ 0, & n < j \le N, \end{cases}$$

то функція $\varphi_n(\overline{FS_n}, \bar{P}_n)$ апроксимує тригонометричний сплайн $S_{11}t_r(f, \Delta_N^t, t)$ у просторі $\Theta_N$.

4. Якщо компоненти вектора $\bar{P}_n$ визначаються співвідношеннями

$$p_j = \begin{cases} \lambda_j^{(m)}, & 0 \le j \le n < N, \\ 0, & n < j \le N, \end{cases}$$

де $\lambda_j^{(m)}$ – послідовність, що поліпшує збіжність рядів Фур'є, то функція $\varphi_n(\overline{FS_n}, \bar{P}_n)$ являє собою тригонометричний сплайн, згладжений у просторі $\theta_N$.

## Література


1. *Денисюк В.П.* Сплайни та сигнали: Монографія. – ЗАТ «ВІПОЛ», 2007, С.117-126.

УДК 533.013.11

*Л.И. Гречихин, д.ф.-м.н., проф.*
*(Минский государственный высший авиационный колледж, г. Минск, Беларусь)*

# СТАТИСТИЧЕСКАЯ АЭРОДИНАМИКА

*Рассмотрены основы статистической аэродинамики. Проведен анализ газодинамического взаимодействия потока воздуха при непосредственном ударе каждой молекулы воздуха с поверхностью обтекаемого тела. Показано, что в уравнении Бернулли следует учитывать тангенциальную скорость потока, а не скорость движения самого потока. При наличии кривизны у обтекаемой поверхности следует учитывать возникающие центробежные ускорения и центробежные силы. Приведены конкретные расчеты обтекания фюзеляжа, крыльев, винтов и лопастей турбин.*

## Введение

Газодинамика в авиации является основой для конструирования и эксплуатации различных летательных аппаратов (ЛА) в атмосфере Земли. Полёты различных типов самолетов основаны на законах динамической газодинамики. В динамической газодинамике применяются два подхода: континуальный и статистический. Континуальный подход был предложен д-Аламбером, а затем развит Эйлером, а основы статистического подхода были разработаны еще Ньютоном. Так называемая «корпускулярная теория Ньютона».

При континуальном подходе лобовое сопротивление тела, равномерно движущегося в неподвижной атмосфере, равно нулю, так как возникающая за телом сила отдачи компенсирует силу лобового сопротивления вследствие искривления потока воздуха. Корпускулярная теория Ньютона наоборот приводила к чрезмерно большому лобовому сопротивлению.

Многие результаты, полученные в рамках континуального подхода, представляют как научный, так и практический интерес. Континуальное обтекание описывается уравнениями: неразрывности, Навье-Стокса, Эйлера и Бернулли. Во всех этих уравнениях не рассматривается непосредственный процесс взаимодействия воздушного потока с движущимся летательным аппаратом. Обычно рассматривается поток воздуха на входе перед ЛА и его трансформация на выходе. При этом процесс непосредственного взаимодействия с каждым элементом ЛА исключается. В результате влияние конкретных конструктивных особенностей на динамику взаимодействия воздушного потока не учитывается. В этой связи возникла *цель*: рассмотреть процесс непосредственного взаимодействия воздушного потока с поверхностью летательного аппарата на основе статистического подхода.

Поставленная цель требует решения следующих задач:

1. Разработать математическую модель описания различных элементов ЛА.
2. Используя статистическую газодинамику, математически описать динамику взаимодействия набегающего потока воздуха с различными элементами ЛА.
3. Создать программное обеспечение для расчета лобового сопротивления фюзеляжа, гребного винта, крыла самолета, турбины и др.
4. Создать программное обеспечение для расчета тяговых усилий гребного винта, подъемной силы крыла самолета, потребляемой мощности турбин и компрессоров.
5. Создать программное обеспечение для расчета моментов сил, создающих закрылками и других управляющих элементов.
6. Разработать программное обеспечение для компьютерного моделирования полета ЛА в реальных условиях.

Каждая из перечисленных задач настолько сложны в математическом описании, что необходимо создавать свое программное обеспечение для каждого конкретного вида ЛА и его каждого отдельно взятого элемента.

## Основы статистической аэродинамики

В статистической аэродинамике рассматривается процесс взаимодействия каждой молекулы с поверхностью летательного аппарата. При этом континуальный режим

формируется тангенциальным потоком воздуха и обуславливает: возможность применения уравнения Бернулли, а при наличии кривизны у обтекаемой поверхности и возникновение центробежных сил.

Рассмотрим, как происходит процесс взаимодействия каждой молекулы воздуха с обтекаемой поверхностью. На рис.1 показана схема такого взаимодействия. При столкновении каждой молекулы воздуха с поверхностью происходит изменение скорости ее движения по нормали к поверхности и тангенциально поверхности. Эти изменения равны:

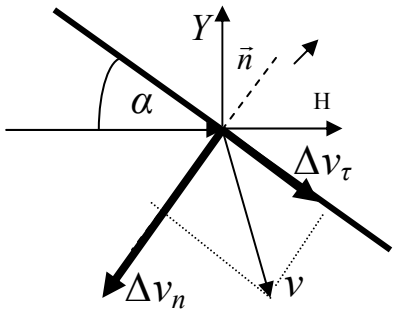



Рис. 1. Схема взаимодействия молекул воздуха с поверхностью канала течения газа

$$\Delta v_n = v\sin(\alpha) \quad и \quad \Delta v_\tau = v\cos(\alpha), \qquad (1)$$

где α – угол атаки.

Поток массы воздуха на элемент поверхности Δ*S* равен: $\Delta\dot{m} = \rho v \Delta S$ . (2)

Декартовую систему координат *XY* расположим в плоскости чертежа (рис. 1), а ось *Z* направим перпендикулярно плоскости чертежа. В этом случае элемент площади $\Delta S = \Delta y \Delta z$.

После взаимодействия с элементом площади Δ*S* часть потока воздуха отразится вдоль оси *X*-ов и ослабит падающий поток. Отраженный поток определится так:

$$\Delta\dot{m}' = \rho \Delta v_x \Delta S = \rho v \sin^2(\alpha)\Delta S . \qquad (3)$$

Здесь $\Delta v_x = \Delta v_n \sin(\alpha) = v\sin^2(\alpha)$.

Результирующий поток, который взаимодействует с элементом поверхности Δ*S* равен:

$$\Delta\dot{m}_{рез.} = \Delta\dot{m} - \Delta\dot{m}' = \rho v \cos^2(\alpha)\Delta S . \qquad (4)$$

Тогда сила, с которой поток воздуха действует на элемент поверхности Δ*S,* в соответствии со вторым законом Ньютона вдоль оси *X*-ов равна:

$$\Delta F_{уд.,x} = \Delta\dot{m}_{рез.}\Delta v_x = 2\rho v^2 \cos^2(\alpha)\sin^2(\alpha)\Delta S , \qquad (5)$$

а вдоль оси *Y*-ов: $\Delta F_{уд.y} = 2\rho v^2 \cos^3(\alpha)\sin(\alpha)\Delta S$ . (6)

Если элемент поверхности Δ*S* обладает радиусом кривизны *R*, то на такой элемент поверхности будет действовать центробежная сила вдоль оси *X*-ов, равная:

$$\Delta F_{Ц,x} = \frac{\Delta\dot{m}_{рез.}\Delta t \Delta v_\tau^2}{R} = \frac{\rho v^2 \cos^2(\alpha)\sin(\alpha)\Delta x \Delta S}{R}, \qquad (7)$$

а вдоль оси *Y*-ов: $\Delta F_{Ц,y} = \frac{\rho v^2 \cos^3(\alpha)\Delta x \Delta S}{R}$ . (8)

В формулах (7) и (8) время взаимодействия потока воздуха с элементом поверхности Δ*S* определяется следующим образом:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{\Delta v_\tau} = \frac{\Delta x}{v\cos^2(\alpha)} . \qquad (9)$$

При движении газа вдоль поверхности со скоростью $\Delta v_\tau$ в соответствии с уравнением Бернулли возникает дополнительное давление, равное вдоль оси *X*-ов:

$$\Delta F_{Б,x} = \frac{\rho(\Delta v_\tau)^2}{2}\Delta S = 0{,}5\rho v^2 \cos^2(\alpha)\sin(\alpha)\Delta S , \qquad (10)$$

А вдоль оси *Y*-ов: $\Delta F_{Б,y} = 0{,}5\rho v^2 \cos^3(\alpha)\Delta S.$ (11)

Результирующая сила действия потока воздуха на элемент поверхности Δ*S* вдоль оси *X*-ов и *Y*-ов равны соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta F_{рез.,x} &= \Delta F_{уд.,x} \pm \Delta F_{Ц,x} \pm \Delta F_{Б,x}; \\ \Delta F_{рез.,y} &= \Delta F_{уд.,y} \pm \Delta F_{Ц,y} \pm \Delta F_{Б,y} \end{aligned} . \qquad (12)$$

В уравнениях (12) при выпуклой поверхности используется знак (-) для оси *X*-ов и знак (+) для оси *Y*-ов, а при вогнутой поверхности знаки изменяются на противоположные.

Сила действия потока воздуха на всю поверхность, с которой происходит взаимодействие независимо от направления:

$$F_{рез.} = \int_S \frac{\Delta F_{рез.}(x,z)}{\Delta S} dxdz \,. \qquad (13)$$

Вычисление интеграла вдоль оси *X*-ов позволяет получать лобовое сопротивление ЛА, а вдоль оси *Y*-ов – подъемную силу крыла самолета. Конкретный расчет лобового сопротивления и подъемной силы крыла самолета ТУ-134 был выполнен в работе [1]. Результаты приведены на рис. 2. Как лобовое сопротивление, так и подъемная сила крыла самолета резко зависят от угла атаки. Это явление следует учитывать при взлете и посадке самолета ТУ-134.

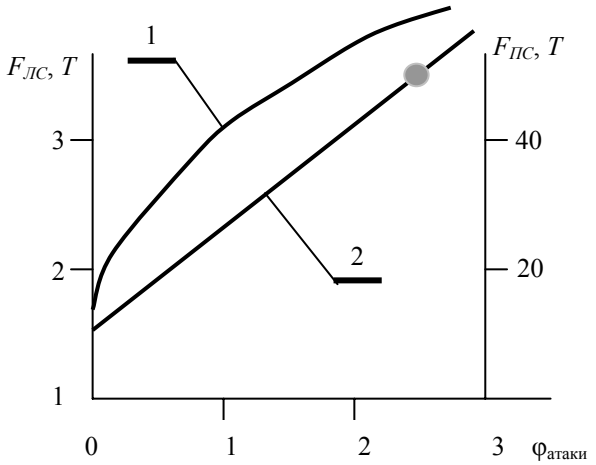



**Рис. 2.** Зависимость результирующих лобового сопротивления (1) и подъемной силы (2) при крейсерском полете самолета ТУ-134 на высоте 9 *км* со скоростью движения 900 *км/час* от угла атаки

Статистический подход анализа газодинамического обтекания существенным образом отличается от континуального подхода. Континуальный подход не позволяет определить изменение внутренней энергии газа в процессе взаимодействия с поверхностью движущегося тела. Передача энергии при ударе молекул воздуха о поверхность происходит вследствие упругого удара путем столкновения с кластерами этой поверхности. В результате такого упругого удара происходит передача энергии от молекулы воздуха к движущемуся телу с вероятностью, равной:

$$\theta = \frac{4mM_{кл}}{(m + M_{кл})^2}, \qquad (14)$$

где $m$ – средняя масса молекул воздуха, а $M_{кл}$ – масса кластера материала поверхности. Так для алюминия $M_{кл} = 21 \cdot 26{,}98 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} = 9{,}41 \cdot 10^{-25}$ кг и $\theta = 0{,}185$. Следовательно, молекулы воздуха переносят на поверхность ЛА в единицу времени на площадь всей конструкции $S_к$ следующее количество энергии:

$$\dot{Q} = \theta \frac{1}{6} n \bar{v} c_V S_к \Delta T \,. \qquad (15)$$

Здесь $n$ – концентрация молекул воздуха в потоке, $\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_Б T}{\pi m}}$ – среднехаотическая скорость молекул воздуха, $c_V = ik_Б/2$ ($i$ - число степеней свободы) – удельная теплоемкость. При столкновении молекул воздуха с дюралевой поверхностью $\dot{Q} = 4{,}879 \cdot 10^4 \, S_к \, \Delta T$. На один квадратный метр внешней поверхности при разности температур в один градус за единицу времени будет передано энергии в нормальных условиях ~ 49 кДж. Это огромная энергия.

На изменение скорости течения воздуха у поверхности движущегося тела тратится энергия за счет внутренней энергии воздуха. Поэтому

$$\Delta E = \frac{\dot{m}\left(\Delta v_n^2 + \Delta v_\tau^2\right)}{2} \Delta t = \frac{\dot{m} \Delta t}{\mu} \frac{i}{2} R \Delta T \,. \qquad (16)$$

Например, при угле падения $45^0$ со скоростью движения воздуха 100 м/с падение температуры воздуха у стенки канала составит ~ 40 К. Когда разогрев поверхности при упругом ударе не превосходит охлаждения вследствие изменения скорости движения потока

воздуха, тогда возникает оледенение. С этим явлением столкнулись на заре развития авиации и поэтому на всех самолетах используются противооледенительные системы. Это явление следует учитывать особенно при работе винтов.

Конкретный расчет лобового сопротивления и тяговых усилий был выполнен для винтов АВ-2 и АВ-72, которые используются на самолетах АН-2 и АН-24. Так для винта АВ-72 при крейсерской скорости 50 м/с и угле атаки $19^0$ результирующая тяга 41483 Н, а для винта АВ-2 результирующее лобовое сопротивление в момент отрыва от взлетной полосы 110 км/ч самолета АН-2, угле атаки винта $8^0$ и регулируемой скорости вращения винта 1400 об/мин составляет 450 кГс, а при крейсерской скорости 180 км/ч на высоте полета 4500 м и максимальном угле атаки $32^0$ результирующее лобовое сопротивление $F_{ЛС}$ ~ 1015 кГс. Механический момент на валу винта и мощность для поддержания заданной скорости вращения составляют в первом случае 260 Кг·м и 281 Л.С., а во втором случае – 680 кГм и 736 Л.С., что соответствует экспериментальным данным [2].

Тяга винта осуществляется вследствие возникновения активной составляющей окружающей среды. Отношение мощности, затрачиваемой окружающей средой в стационарных условиях на поддержание скорости движения самолета, к мощности преодоления лобового сопротивления является коэффициентом преобразования, а не коэффициентом полезного действия. По существу в данном случае реализуется тепловой насос, для которого:

$$\eta = \frac{F_{тяги} v_c}{F_{ЛС} \pi n L} . \qquad (17)$$

Конкретно для винта АВ-72 при скорости движения самолета 23 м/с и угле атаки $9^0$ коэффициент преобразования равен 1,04, а при скорости движения 50 м/с с углом атаки $19^0$ составляет 1,06. Для тепловых насосов коэффициенты преобразования достигнуты более 10-и. По этому параметру винт АВ-72 не являются оптимальными. При взлете и посадке винтомоторного самолета необходимо обеспечить плавный переход от одного к другому режиму работы винта. Чтобы обеспечить такой переход необходимо угол кручения для винта АВ-72 обеспечить ~$23^0$. Результаты расчета работы винта АВ-2 приведены на рис. 3.

Изменяя конструкцию винта можно получить коэффициент преобразования при соответствующем угле атаки 10 и более. В этой связи проблема создания новых конструкций воздушных гребных винтов с более эффективным коэффициентом преобразования по-прежнему является актуальной. Например, более эффективными оказались саблевидные лопасти гребных винтов, которые установлены на самолете АН-70. Авторы работы [3] предложили гребной винт двойной саблевидности, лопасти которого построены из спиральных участков в виде трех полуколец с поверхностью Мёбиуса. В результате такой винт позволил увеличить тягу как минимум в два и более раза по сравнению с традиционным трехлопастным винтом такого же диаметра.

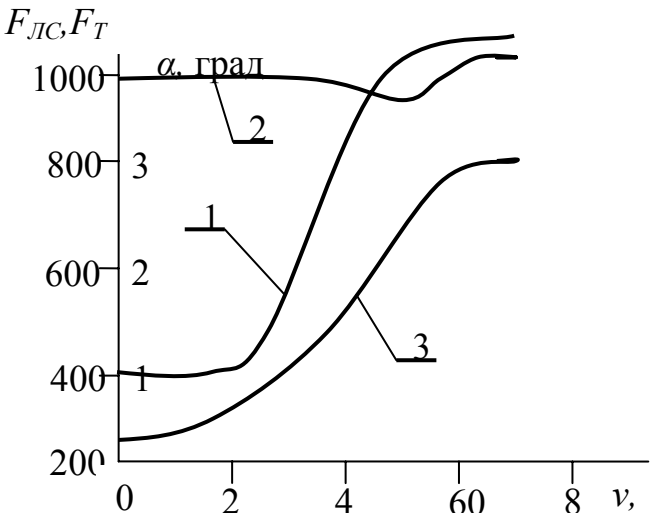


Рис. 3. Зависимость от скорости движения само-лета АН-2 при работе двигателя 0,85 номиналь-ного: 1 - лобового сопротивле-нии; 2 – тягового усилия и 3 – угла атаки лопастей винта

Таким образом, общий принцип работы винта самолета определяется возникновением активной составляющей окружающей среды работающего гребного винта, которая обеспечивает принцип преобразования энергии типа вихревого теплового насоса. При разработке гребных винтов следует руководствоваться уже достигнутыми результатами по их конструированию, но решительным образом отказаться от ранее бытовавших представлений о вихревом

характере возникновения тяговых усилий с определением коэффициента полезного действия, как не соответствующих современному уровню знаний в этой области. Экспериментальную аэродинамику следует использовать только для уточнения модели характера взаимодействия воздушного гребного винта с окружающей неподвижной атмосферой, а в последующем перейти на полное компьютерное моделирование при создании новых типов винтомоторных летательных аппаратов различного назначения. Для этого необходимо разработать аэродинамику винтомоторного самолета с учетом всех его конструктивных элементов от винта до хвостового оперения на новых физических принципах.

Статистическая аэродинамика позволила разобраться с работой турбины, которая преобразует тепловую энергию в механическую работу. Для турбовентиляторных и турбореактивных двигателей турбины являются основным элементом, который обеспечивает работу двигателя. Конкретный расчет работы турбины, у которой лопатки аппроксимированы эллипсом, приведен на рис. 4.

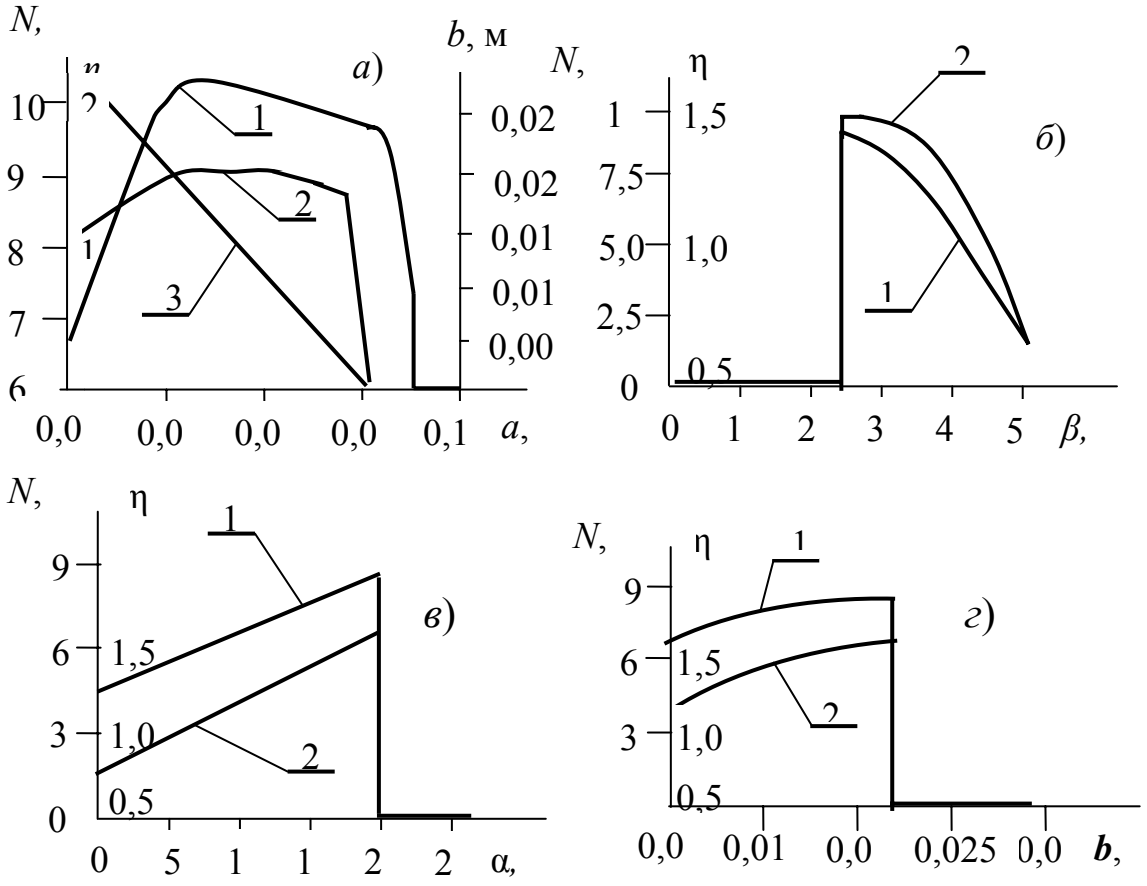



Рис. 4. Зависимость мощности турбины (1) и коэффициента преобразования (2) от различных изменяемых параметров**:** *а*) максимальной мощности от размеров лопатки (3 – размер малой полуоси эллипса) при $\alpha = 20^0$, $\beta = 25^0$; *б*) угла атаки потока воздуха при $a = 0{,}03$ м, $b = 0{,}022$ м, $\alpha = 20^0$; *в*) угла поворота большой оси эллипса при $a = 0{,}03$ м, $b = 0{,}022$ м, $\beta = 25^0$ и *г*) малой оси эллипса при $a = 0{,}03$ м, $\alpha = 20^0$, $\beta = 25^0$.

Как работают турбины, рассмотрим на примере двигателя D-30 II серии, установленного на самолете ТУ-134. При крейсерском полете (номинальный режим) расход топлива составляет 1432 кг/час [4]. Общая энергия, которая выделяется в единицу времени при полном сгорании топлива ~ 23 200 Л.С. Полученная мощность расходуется на преодоление лобового сопротивления самолета и на вращение турбин высокого и низкого давления.

Преодоление лобового сопротивления осуществляется тяговыми усилиями двигателей. Для самолета ТУ-134 при крейсерском полете со скоростью 900 км/ч на высоте 9 км тяговые усилия каждого двигателя составляют 1,6 Т. Скорость истечения продуктов

сгорания ~ 600 м/с. Мощность тяговых усилий обоих двигателей получается ~ 25240 Л.С. На вращение турбин мощности не остается. Однако мощность, развиваемая турбиной высокого давления, составляет 34000 Л.С., а мощность турбины низкого давления – 19500 Л.С. Результирующая мощность, которую развивают турбины, равна 53500 Л.С. [5]. Получается, что турбины работают как тепловой насос с достаточно высоким коэффициентом преобразования. В двигателе D-30 II серии используются две турбины высокого и низкого давления. Турбина высокого давления содержит два диска. На первом диске расположено 88 лопаток, размер которых по хорде, обращенной к потоку, 3 см, размер входного межлопаточного канала ~ 2 см, установочный угол ~ $45^0$. Сопловой аппарат направляет поток воздуха в межлопаточный канал под углом в среднем $51^0$. Скорость потока на выходе из сопла Лаваля ~ 190 м/с и скорость вращения турбины 196 об/с. Средняя высота лопаток 8 см. В соответствии с этими данными на оси одного диска турбины высокого давления реализуется мощность 6430 кВт. На самолете ТУ-134 используются два двигателя D-30 II серии и турбины высокого давления потребляют мощность 34000 Л.С.[1] В достаточно грубом приближении теоретический расчет дает 34650 Л.С. Следовательно, разработанная теория с применением статистической газодинамики может быть рекомендована для компьютерного моделирования работы турбины.

С позиций статистической аэродинамики рассмотрим, какая возникает тормозящая сила при посадке самолета АН-24 вследствие полностью выпущенных закрылков. В момент касания взлетной полосы АН-24 имеет скорость 175 км/ч. В этот момент все закрылки выпущены на $\beta$ = 38 градусов. Площадь всех закрылок 15 $м^2$ и расположены симметрично относительно фюзеляжа. Закрылки можно считать плоскими. Тогда в процессе взаимодействия закрылок с набегающим воздухом центробежное воздействие потока можно не учитывать. Результат вычисления по (13) дает: $F_x$ = 5970 Н = 608 кГс. Самолет АН-24 испытывает значительную тормозящую силу вследствие воздействия воздушного потока в момент посадки при полностью выпущенных закрылках. Возникающий при этом момент силы опрокидывает самолет по ходу движения.

**Выводы**

Статистическая аэродинамика основана на использовании молекулярно-кинетической теории газов и позволила объединить корпускулярную теорию Ньютона и континуальную теорию д-Аламбера-Эйлера в единую теорию газодинамического взаимодействия движущегося тела в газовой среде. В результате получены правильные значения лобового сопротивления, подъемной силы крыла самолета, тяговых усилий винта самолета и мощности работающих газовых турбин.

В разработанной модели статистической аэродинамики воздух рассматривался как идеальный газ, а упругое взаимодействие зеркальное. Поэтому для полного компьютерного моделирования полета различных типов самолетов и вертолетов необходимо учесть сжимаемость воздуха и его вязкость, а в упругом взаимодействии учесть индикатрису рассеяния.

**Список литературы**

1. *Гречихин Л. И.* Современная аэродинамика полета летательных аппаратов и возможности компьютерного моделирования /Материалы VIII Международной научно-технической конференции «АВИА-2007». – Киев: НАУ, 2007. Т.2. С. 33-95 – 33.104.

2. *Радченко И. В., Крамчанинов В. П., Дубринский В. П.* Самолет 2 – М.: Транспорт, 1974. – 456с.

3. *Шпади А. Л., Тимофеев В. Ф.* Невинтовые пропеллеры /Проблемы подготовки специалистов для гражданской авиации: материалы международной научно-практической конференции 20-21 ноября 2008 г.: научное издание // Под ред. Н. У. Ушакова. – Ульяновск: УВАУ ГА, 2008. С. 40-43.

4. *Лигум Т. И.* Аэродинамика самолета ТУ-134А. – М.: Транспорт, 1975. – 320 с.

5. *Крюков А. М.* Конструкция и летная эксплуатация двигателя D-30 2сер. – М.: Воздушный транспорт, 1975. – 198 с.

УДК 533.6.013.11

*Л.И. Гречихин, д.ф.-м.н., проф.*
*(Минский государственный высший авиационный колледж, Республика Беларусь),*
*А.Б. Сивашко (Военная академия Республики Беларусь, Республика Беларусь)*

# АЭРОДИНАМИКА ЛЕТАЮЩЕГО КРЫЛА

*Для летающего крыла разработаны: математическая модель описания поверхности, статистическая газодинамика взаимодействия набегающего потока воздуха с поверхностью, программное обеспечение для расчета подъемной силы, программное обеспечение для расчета лобового сопротивления. Показана возможность создания программного обеспечения для расчета моментов сил, создающих закрылками и программного обеспечения для компьютерного моделирования полета летающего крыла в реальных условиях.*

**Введение.** Для уменьшения лобового сопротивления летательного аппарата (ЛА) на ранней стадии развития авиации было предложено использовать летающее крыло типа дельтоплана. В этом случае упрощается управление самолетом и, что, весьма важно, значительно снижается расход топлива. Особое значение летающее крыло приобретает при его использовании в беспилотных летательных аппаратах (БЛА), для которых важными являются следующие требования:

- БЛА должен обладать такой аэродинамикой, чтобы управление его движением было максимально простым и достаточно надежным;
- БЛА должен совершать полет длительное время при минимальном энергопотреблении;
- БЛА должен выполнять сложные фигуры высшего пилотажа и при этом опасные маневры должны быть сведены до минимума;
- БЛА должен максимально защищен от внешних воздействий окружающей среды, радиопомех и др.

В связи с выполнением перечисленных требований к БЛА поставлена **цель**: разработать теоретические основы аэродинамики летающего крыла, на основе которой путем компьютерного моделирования должна быть установлена оптимальная форма летающего крыла с минимальным количеством управляющих элементов.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель описания летающего крыла.
2. Используя статистическую газодинамику, математически описать динамику взаимодействия набегающего потока воздуха со всей поверхностью летающего крыла.
3. Создать программное обеспечение для расчета подъемной силы летающего крыла.
4. Создать программное обеспечение для расчета лобового сопротивления летающего крыла.
5. Создать программное обеспечение для расчета моментов сил, создающих закрылками и других управляющих элементов.
6. Разработать программное обеспечение для компьютерного моделирования полета летающего крыла в реальных условиях.

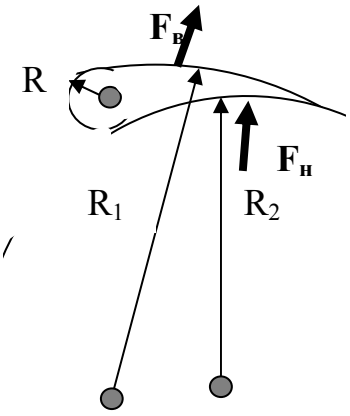



Рис.1. Общая схема профиля Жуковского крыла самолета

Ниже последовательно рассмотрим пути и методы решения поставленных задач.

**Математическая модель летающего крыла.** Первая оптимальная форма крыла

самолета была предложена Н. Е. Жуковским. Крыло Жуковского формировалось тремя радиусами, как это показано на рис. 1 [1].

На аэродинамических трубах оптимальная форма плоского крыла получена весьма сложной формы и представляется в виде таблиц ЦАГИ или NASA. В качестве примера в табл. 1 приведена одна из таких таблиц.

*Таблица 1*

**Крыло для монопланa «NASA-43012 mod»**

| X, % | 0 | 1,25 | 2,5 | 5,0 | 7,5 | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Y_B$, % | 0 | 3,55 | 4,71 | 6,33 | 7,42 | 8,2 | 9,02 | 9,26 | 9,25 |
| $Y_H$, % | 0 | -0,82 | -1,0 | -1,25 | -1,40 | -1,42 | -1,52 | -2,22 | -2,64 |
| X, % | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 95 | 100 |
| $Y_B$, % | 9,10 | 8,46 | 7,53 | 6,35 | 5,0 | 3,52 | 1,9 | 1,02 | 0,13 |
| $Y_H$, % | -2,91 | -3,15 | -3,07 | -2,78 | -2,32 | -1,73 | -1,0 | -0,56 | -0,13 |

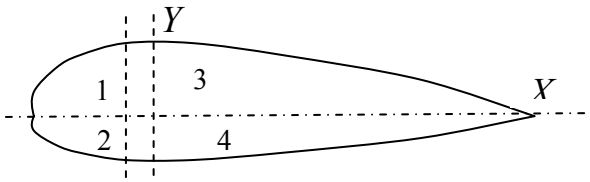



Рис. 2. Сечение летающего крыла

Реальные формы плоских крыльев достаточно сложны и их математическое описание на различных участках разное. Так для крыла самолета ТУ-134 в работе [2] используются 24 математических выражения в 4- различных сечениях.

Крыло, полученное из таблиц NASA, приведено на рис. 2. Для математического описания каждого сечения крыла используются 4-е функции. Эллипсоидальное 1 для верхней плоскости и 2 для нижней плоскости, у которых большие ($a$) и малые ($b$) оси эллипса разные. Участки 3 и 4 аппроксимируются цилидрическими функциями со своими радиусами. Всего для описания сужающегося крыла используются 20 математических выражений. Например, для крыла размером в виде трапеции 380 X 400 X 270 мм, на основе которого может быть построено БЛА малого размера, все 20 математических выражения сведены в табл. 2.

Конкретные значения, приведенные в табл. 2 для крыла NASA, получены следующим образом. Производилось измерение длины и значения огибающей в четырех сечениях крыла. Измерялись также положения максимумов для верхней и нижней плоскостях по оси X-ов. По этим данным получали вначале значения большой полуоси эллипса, используя формулу определения периметра эллипса, т.е.

$$4L = \pi[1{,}5(a+b) - \sqrt{ab}],$$

где $L$ – длина четверти периметра эллипса. Длина четверти периметра эллипса определялась экспериментально. Затем производилось вычисление центрального угла по формуле:

$$\alpha = arctg\left(\frac{b}{L-a}\right).$$

*Таблица 2*

**Аппроксимирующие функции летающего крыла в пяти сечениях**

| Сечение – 1 | | | |
|---|---|---|---|
| Верхняя плоскость | | Нижняя плоскость | |
| $0 \le x \le 0{,}084$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,084; b = 0,039 | $0{,}084 \le x \le 0{,}375$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 2,139; $x_0$ = 0,084 | $0 \le x \le 0{,}0674$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,0674; b = 0,031 | $0{,}0674 \le x \le 0{,}375$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 3,063; $x_0$ = 0,067 |
| Сечение – 2 | | | |
| | | | |
| $0 \le x \le 0{,}0792$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,079; b = 0,034 | $0{,}0792 \le x \le 0{,}355$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 2,237; $x_0$ = 0,079 | $0 \le x \le 0{,}062$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,062; b = 0,0262 | $0{,}062 \le x \le 0{,}355$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 3,27; $x_0$ = 0,062 |

| Сечение – 3 | | | |
|---|---|---|---|
| Верхняя плоскость | | Нижняя плоскость | |
| $0 \le x \le 0{,}0743$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,074; b = 0,0285 | $0{,}0743 \le x \le 0{,}325$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 2,243; $x_0 = 0{,}074$ | $0 \le x \le 0{,}057$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,057; b = 0,0215 | $0{,}0573 \le x \le 0{,}325$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 3,347; $x_0 = 0{,}057$ |
| Сечение – 4 | | | |
| Верхняя плоскость | | Нижняя плоскость | |
| $0 \le x \le 0{,}0693$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,069; b = 0,0233 | $0{,}0693 \le x \le 0{,}295$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 2,212; $x_0 = 0{,}074$ | $0 \le x \le 0{,}0517$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,052; b = 0,0167 | $0{,}0517 \le x \le 0{,}295$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 3,541; $x_0 = 0{,}052$ |
| Сечение – 5 | | | |
| Верхняя плоскость | | Нижняя плоскость | |
| $0 \le x \le 0{,}0641$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,064; b = 0,018 | $0{,}0641 \le x \le 0{,}270$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 2,41; $x_0 = 0{,}064$ | $0 \le x \le 0{,}04613$<br>$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}$<br>a = 0,046; b = 0,012 | $0{,}04613 \le x \le 0{,}27$<br>$y = \sqrt{R^2 - x^2}$<br>R = 4,154; $x_0 = 0{,}046$ |

Окончательно радиус скругления вычислялся по формуле:

$$R = \frac{180 l_1}{\pi \alpha}.$$

Здесь $l_1$ – значение длины по внешней поверхности до максимального значения толщины крыла.

Полученные таким образом значения большой полуоси эллипса и радиуса скругления верхней и нижней поверхностей летающего крыла приведены в табл. 2.

Используя математическую аппроксимацию табл. 2 рассмотрим, как происходит взаимодействие набегающего воздушного потока с летающим крылом.

**Динамика взаимодействия воздуха с летающим крылом**. При столкновении воздушного потока с лобовой поверхностью летающего крыла каждая молекула воздуха после столкновения изменяет свое направление движения. При упругом ударе с учетом зеркального отражения изменение скорости движения молекул воздуха по нормали к поверхности составит (см. рис. 3):

$$\Delta v_n = v \sin(\alpha), \qquad (1)$$

а вдоль поверхности

$$\Delta v_\tau = v \cos(\alpha). \qquad (2)$$

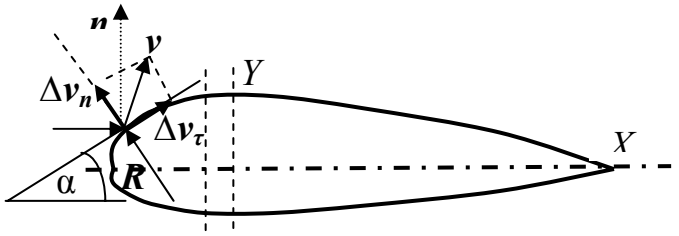



Рис. 3. Общая схема взаимодействия воздушного потока с лобовой поверхностью летающего крыла

Если направить ось *X*-ов вдоль большой оси эллипса (*a*), ось *Y*-ов вдоль малой оси эллипса (*b*), а ось *Z* вдоль крыла, то лобовая поверхность летающего крыла аппроксимировалась эллипсом вида:

$$y = b\sqrt{1 - x^2/a^2}. \qquad (3)$$

На основании (3) угол $\alpha$ в (1) и (2) определится так:

$$\alpha = arctg[y'(x)], \qquad (4)$$

где $y'(x)$ - производная по $x$ от функции (3).

Масса воздуха, которая взаимодействует с элементом поверхности $\Delta S = \Delta y \Delta z$, равна:

$$\Delta m = \rho \Delta S v \Delta t. \qquad (5)$$

Здесь $\rho$ – плотность воздуха на высоте полета крыла самолета, $v$ – скорость движения самолета и $\Delta t = \dfrac{\Delta l}{\Delta v_\tau} \approx \dfrac{\Delta x}{v\cos^2(\alpha)}$, так как $\Delta l = R\Delta\alpha \approx \Delta x / \cos(\alpha)$.

Масса воздуха, которая отражается от лобовой поверхности в направлении вдоль оси $X$-ов, составит:
$$\Delta m_1 = \rho \Delta S \Delta v_x \Delta t , \qquad (6)$$

а
$$\Delta v_x = \Delta v_n \sin(\alpha) = v \sin^2(\alpha) . \qquad (7)$$

На основании (6) и (7) результирующая масса воздуха, которая взаимодействует с поверхностью $\Delta S$ вдоль оси $X$-ов, равна:
$$\Delta m_{рез.} = \Delta m + \Delta m_1 = \rho \Delta S v [1 + \sin^2(\alpha)]\Delta t . \qquad (8)$$

Умножив (8) на $\Delta v_x$ , получим изменение импульса вдоль оси $X$-ов. Изменение импульса за единицу времени определяет силу взаимодействия воздушного потока с лобовой поверхностью летающего крыла, т.е.
$$\Delta F_x = \rho \Delta S v^2 [1 + \sin^2(\alpha)]\sin^2(\alpha) , \qquad (9)$$

где $\Delta S = \Delta y \Delta z$.

После удара молекул воздуха о лобовую поверхность крыла вдоль поверхности возникает поток воздуха со скоростью $\Delta v_\tau$ . Движется этот поток по радиусу кривизны в каждой точке эллиптической поверхности. Радиус кривизны находится путем сравнения производной эллиптической поверхности с производной шаровой поверхности. Следовательно:
$$R_x = \frac{1}{b}\sqrt{a^4 - (a^2 - b^2)x^2} . \qquad (10)$$

Масса воздуха $\Delta m$, двигаясь по радиусу кривизны $R_x$, приобретает центростремительное ускорение и соответственно центробежную силу:
$$\Delta F_Ц = \Delta m \frac{\Delta v_\tau^2}{R_x} = \rho \Delta S \Delta x v^2 \cos(\alpha) / R_x . \qquad (11)$$

Центробежная сила направлена вдоль радиуса кривизны, т.е. по нормали к поверхности. Составляющая этой силы вдоль оси $X$-ов равна:
$$\Delta F_{Ц,x} = \rho \Delta y \Delta z \Delta x v^2 \cos(\alpha)\sin(\alpha) / R_x . \qquad (12)$$

При движении потока воздуха вдоль обтекаемой поверхности возникает падение давления в соответствии с уравнением Бернулли. Это приводит к возникновению силы вдоль нормали к поверхности $\Delta S = R_x \Delta\alpha \Delta z = \Delta x \Delta z / \cos(\alpha)$, а именно:
$$\Delta F_Б = \frac{\rho \Delta v_\tau^2}{2} R \Delta\alpha \Delta z = 0{,}5 \rho \Delta x \Delta z v^2 \cos(\alpha) ,$$

а вдоль оси $X$-ов:
$$\Delta F_{Б,x} = 0{,}5 \rho \Delta z v^2 \cos(\alpha)\sin(\alpha)\Delta x . \qquad (13)$$

Результирующая сила, действующая на элемент поверхности $\Delta S$ , для верхней поверхности равна:
$$\Delta F_{рез.,1} = \Delta F_x - \Delta F_{Ц,x} - \Delta F_{Б,x} . \qquad (14)$$

Аналогично имеем для нижней поверхности:
$$\Delta F_{рез.,2} = \Delta F'_x - \Delta F'_{Ц,x} - \Delta F'_{Б,x} . \qquad (15)$$

Результирующая сила лобового сопротивления эллиптической поверхности определяется интегралом вида:
$$F_{эл,x} = \frac{1}{a}\int_0^a (\Delta F_{рез.,1} + \Delta F_{рез.,2})dx . \qquad (16)$$

Для круговой цилиндрической составляющей ударный механизм отсутствует, а присутствует центробежная сила и сила, обусловленная уравнением Бернулли. Скорость движения вдоль круговой поверхности определяется скоростью движения крыла самолета и скоростью удаления молекул воздуха в окружающую атмосферу после взаимодействия с

лобовой поверхностью крыла. Отраженный поток воздуха является активной составляющей окружающей среды. На каждом элементе поверхности скорость удаления потока воздуха определяется центробежным ускорением. Поэтому по нормали к поверхности

$$dv_n = adt = \frac{\Delta v_\tau^2}{R_x} dt = \frac{\Delta v_\tau^2}{R_x} \frac{dx}{\Delta v_\tau \cos(\alpha)} = \frac{vdx}{R_x}. \qquad (17)$$

Проекция этой скорости на ось *Y*-ов на основании рис. 3 составляет:

$$dv_y = \frac{v}{R_x}\cos(90^0 - 2\alpha)dx = \frac{v}{R_x}\sin(\alpha)\cos(\alpha)dx. \qquad (18)$$

Здесь угол $\alpha$ определяется по (4), а радиус кривизны по (10). Результирующая скорость удаления на границе перехода от эллиптической к цилиндрической аппроксимации находится путем интегрирования функции (18), т.е.

$$v_y = \int_0^a \frac{v}{R_x}\sin(\alpha)\cos(\alpha)dx. \qquad (19)$$

Скорость движения потока воздуха вдоль цилиндрической поверхности равна:

$$v_{кр.} = \sqrt{v_y^2 + v_x^2}, \qquad (20)$$

где $v_x$ - скорость движения БЛА.

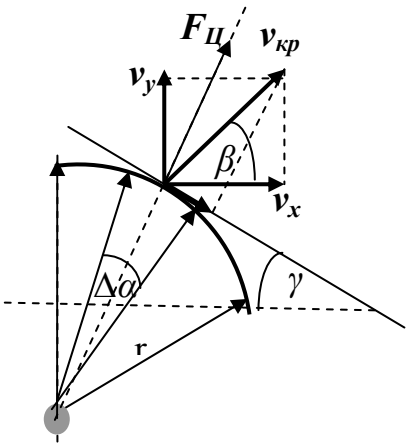


Рис. 4. Схема расчета сил взаимодействия с цилиндрической поверхностью

Тангенциальная скорость на удалении *x* в соответствии с рис. 4 находится по формуле:

$$v_\tau = v_{кр.}\cos(\beta + \gamma), \qquad (21)$$

где угол $\beta = arctg(v_y / v_x)$, а угол $\gamma = arctg\left(\frac{x}{\sqrt{R_x^2 - x^2}}\right)$.

На основании рис. 4 с учетом (20) и (21) для центробежной силы получаем следующее значение:

$$\Delta F_Ц'' = M\frac{v_\tau^2}{R_x} = M\frac{v_{кр.}^2 cos^2(\beta + \gamma)}{R_x}. \qquad (22)$$

Здесь $M = \rho_0 b\Delta z v_x \Delta t$, а $\rho_0$ – плотность воздуха в окружающей среде и $\Delta t = r\Delta\alpha / \Delta v_\tau = \Delta x / [\Delta v_\tau \cos(\gamma)]$. Составляющая центробежной силы по оси *X*-ов равна:

$$\Delta F_{Ц,x}'' = \rho_0 b\Delta x\Delta z v_x v_{кр.}\cos(\beta + \gamma)tg(\gamma)/R_x. \qquad (23)$$

На основании третьего закона Ньютона центробежная сила на круговом сечении является силой отдачи, и ее действие уменьшает лобовое сопротивление.

Плотность воздуха по оси X-ов уменьшается по закону:

$$\rho = \rho_0 \frac{1}{1 + v_y \Delta t_ч / b}, \qquad (24)$$

где $\Delta t_x$ – время прихода потока воздуха в точку *x*, т.е. $\Delta t_x = \frac{x}{v_x}$.

Кроме центробежной силы следует учитывать воздействие движущегося потока воздуха на основании уравнения Бернулли. В этом случае сила отдачи на площадь $\Delta S = R_x\Delta\alpha\Delta z = \frac{\Delta x\Delta z}{cos(\gamma)}$ по нормали к ее поверхности составит:

$$\Delta F_Б'' = \frac{\rho\Delta v_\tau^2}{2} r\Delta\alpha\Delta z = 0{,}5\rho v_{кр.}^2\cos^2(\beta + \gamma)r\Delta\alpha\Delta z, \qquad (25)$$

а сила отдачи вдоль оси *X*-ов равна:

$$\Delta F''_{Б,x} = 0{,}5\rho v^2_{кр.} \cos^2(\beta+\gamma)\sin(\gamma)\Delta x\Delta z / \cos(\gamma)\,. \qquad (26)$$

Результирующая сила отдачи находится путем интегрирования выражения:

$$F''_{рез.} = \frac{1}{L-a}\int_a^{L-a}(\Delta F''_{Ц,ч} + \Delta F''_{Б,x})dx\,, \qquad (27)$$

Результирующее лобовое сопротивление находится следующим образом:

$$F_{ЛС} = F_{эл.x} - F''_{рез.} \qquad (28)$$

**Подъемная сила летающего крыла.** Формулы для определения подъемной силы летающего крыла БЛА аналогичны формулам для определения лобового сопротивления. Если лобовое сопротивление получено путем проекции нормальных сил на ось *X*-ов, то подъемная сила летающего крыла определится путем проекции нормальных сил на ось *Y*-ов. Следовательно, блок формул определения подъемной силы летающего крыла для эллипсоидальной формы представится так:

$$\begin{aligned}
&\Delta F'''_{y} = \rho(y_2 - y_1)\Delta z v^2(1+\sin^2\alpha)\sin(\alpha)\cos(\alpha);\\
&\Delta F'''_{Ц,y} = \rho(y_2 - y_1)\Delta z\Delta x v^2\cos^2(\alpha)/R_{кр.};\\
&\Delta F'''_{Б,y} = 0{,}5\rho\Delta z\Delta x v^2\cos^2(\alpha).
\end{aligned} \qquad (29)$$

Для круговой цилиндрической поверхности подъемная сила крыла возрастает на величину центробежной силы и силы, определяемой уравнением Бернулли. Центробежная сила вдоль нормали к поверхности равна:

$$\Delta F'''_{Ц,y} = \Delta M_{рез.}\frac{v^2\cos^2(\gamma)\cos^2(\beta+\gamma)}{R_{кр.}}, \qquad (30)$$

где $\Delta M_{рез.} = \rho b\Delta z v\Delta t$; $\Delta t = \dfrac{R_{кр.}\Delta\alpha}{v_\tau} = \dfrac{\Delta x}{\cos(\gamma)}\dfrac{1}{v\cos(\beta+\gamma)}$. В направлении оси *Y*-ов центробежная сила равна:

$$\Delta F'''_{Ц,y} = \rho b\Delta z v^2\cos(\beta+\gamma)\cos(\gamma)\Delta x / R_{кр.}\,. \qquad (31)$$

На основании уравнения Бернулли получаем дополнительно силу действия на отдельный элемент площади кругового сечения в виде:

$$\Delta F'''_{Б,y} = 0{,}5\rho v^2\cos^2(\beta+\gamma)\Delta z\Delta x\,. \qquad (32)$$

В формуле (32) плотность воздуха определяется по (24).

Результирующие значения подъемной силы летающего крыла равны соответственно:

$$\begin{aligned}
&F_{эл.,y} = \frac{1}{a}\int_0^a(-\Delta F'''_y + \Delta F'''_{Ц,y} + \Delta F'''_{Б,y})dx;\\
&F_{кр.,y} = \frac{1}{L-a}\int_0^{L-a}(\Delta F'''_{Ц,y} + \Delta F'''_{Б,y})dx; \qquad .\\
&F_{ПС} = F_{эл.,y} + F_{кр.,y}
\end{aligned} \qquad (33)$$

По оси симметрии дельтообразного крыла расположен винт. Работающий винт и устройство его крепления обладают лобовым сопротивлением. Рассмотрим этот вид лобового сопротивления.

**Лобовое сопротивление винта**. Лобовое сопротивление винта содержит две составляющие: несущий коп, на котором установлен сам винт, и непосредственно вращающиеся лопасти винта.

Коп можно аппроксимировать эллипсоидом вращения, как это показано на рис. 5. Каждая молекула воздуха взаимодействует с поверхностью $\Delta S$ независимо и при этом изменяется скорость движения вдоль радиуса кривизны на величину:

$$\Delta v_n = v_x\sin\gamma\,, \qquad (35)$$

а вдоль поверхности:

$$\Delta v_\tau = v_x\cos(\gamma)\,. \qquad (36)$$

Взаимодействующая масса с элементом поверхности $dS = \pi( y_2^2 - y_1^2)$ вдоль оси $X$-ов равна:

$$\Delta m = \rho\pi(y_2^2 - y_1^2)v_x \Delta z \Delta t\,, \qquad (37)$$

где $\Delta t$ – время взаимодействия массы $\Delta m$ с элементом поверхности $\Delta S$:

$$\Delta t = R_x \Delta\alpha / \Delta v_\tau = \Delta x / v_x \cos^2(\gamma)\,. \qquad (38)$$

После взаимодействия набегающего потока воздуха с элементом поверхности $\Delta S$ создается обратный поток величиной:

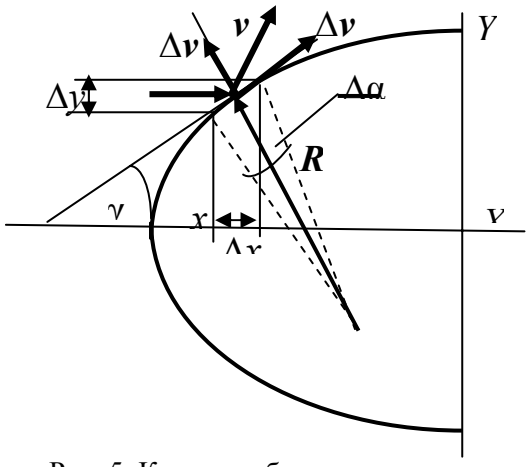



Рис. 5. Картина обтекания осесимметричного тела вращения эллипсоидальной формы

$$-\Delta m = \pi(y_2^2 - y_1^2)\rho\Delta v_x \Delta t\,, \qquad (39)$$

где $\Delta v_x = \Delta v_n \sin(\gamma) = v_x \sin^2(\gamma)$.

Обратный поток воздуха ослабляет падающий поток. Поэтому результирующая масса воздуха, которая взаимодействует с элементом поверхности $\Delta S$, равна:

$$\Delta m_{рез.} = \Delta m + (-\Delta m)\,. \qquad (40)$$

Умножая результирующий поток воздуха на изменение скорости вдоль оси $X$-ов, получаем изменение импульса вдоль оси $X$-ов. Следовательно, изменение импульса воздействия прямого и обратного потоков на элемент поверхности $\Delta S$ находится по формуле:

$$\Delta P = \Delta v_x \Delta m_{рез.}\,. \qquad (41)$$

На основании второго закона Ньютона для силы лобового сопротивления для элемента поверхности $\Delta S$ получаем следующую формулу:

$$\Delta F_{уд.} = 2\pi(y_2^2 - y_1^2)\rho v_x^2 \sin^2(\gamma) cos^2(\gamma) = 2\pi(y_1 + y_2)\rho v_x^2 \sin^3(\gamma)\cos(\gamma)\Delta x\,. \quad (42)$$

Угол $\gamma$ находится по формуле: $\gamma = arctg(y')$, где $y'$ производная от выражения (3).

Составляющая скорости потока вдоль поверхности обтекаемого тела перпендикулярно радиусу кривизны $\Delta v_\tau$ создает континуальное обтекание. Наличие кривизны у поверхности приводит к тому, что поток воздуха при континуальном обтекании приобретает центробежное ускорение, а вследствие этого на массу $\Delta m$ действует отталкивающая сила, направленная по нормали к поверхности. Эта составляющая создает дополнительное лобовое сопротивление на основании (10), (36), (38) и (40), равное:

$$\Delta F_{ц,x} = \Delta m \frac{\Delta v_\tau^2}{R_x} = \pi(y_2^2 - y_1^2)\rho \frac{v_x^2}{R_x}\cos^3(\gamma)\sin(\gamma)\Delta x\,. \qquad (43)$$

В соответствии с уравнением Бернулли движущийся поток воздуха вдоль обтекаемой поверхности со скоростью $\Delta v_\tau$ создает силу давления на элемент площади $\Delta S = R_x \Delta\alpha\ \Delta y = \Delta x \Delta y/\cos(\gamma)$:

$$\Delta F_{Б,x} = \frac{\rho \Delta v_\tau^2}{2}\Delta x \Delta z / \cos(\gamma) = 0{,}5\rho v_x^2 \Delta x \Delta y \cos(\gamma)\sin(\gamma)]\,. \qquad (44)$$

Результирующая сила лобового сопротивления на всю поверхность обтекаемого осесимметричного тела вращения составит:

$$F_{ЛС,пов} = \frac{1}{a}\int_0^a (\Delta F_{уд.} + \Delta F_{ц,x} + \Delta F_{Б,x})dx\,. \qquad (45)$$

При вращении винта ометаемая им поверхность препятствует полному прохождению набегающего потока воздуха. Коэффициент заполнения ометаемой площади, которая препятствует прохождению потока воздуха, составляет:

$$\xi = \frac{kh}{\pi d}\,, \qquad (46)$$

где $k$ – количество лопастей, $h$ – ширина лопасти винта и $d$ – диаметр ометаемой площади.

Установочный угол $\delta$ лопастей к потоку воздуха задан конструкцией винта, а также задана крутка лопастей $\sigma$ . В итоге удары молекул воздуха о двухлопастной винт создает силу сопротивления равную:

$$F_{лоп.} = 2\rho h d v_x^2 \cos^2(\delta + \sigma). \qquad (47)$$

Результаты расчета лобового сопротивления и подъемной силы рассматриваемого крыла с учетом работающего винта в зависимости от скорости полета и угла атаки приведены в табл. 3

*Таблица 3*

**Лобовое сопротивление и подъемная сила летающего крыла, аппроксимированного функциями табл. 2**

| Угол атаки | Параметр | Скорость движения самолета, км/ч | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |
| $0^0$ | $F_{ЛС}$, кГс | 0,65 | 1,30 | 1,97 | 2,64 | 3,31 | 3,99 | 4,68 | 5,37 |
| | $F_{ПС}$, кГс | 1,12 | 2,25 | 3,37 | 4,50 | 5,62 | 6,75 | 7,87 | 8,99 |
| $1^0$ | $F_{ЛС}$, кГс | 0,68 | 1,37 | 2,06 | 2,76 | 3,47 | 4,17 | 4,89 | 5,61 |
| | $F_{ПС}$, кГс | 1,19 | 2,38 | 3,57 | 4,76 | 5,95 | 7,14 | 8,33 | 9,52 |
| $2^0$ | $F_{ЛС}$, кГс | 0,72 | 1,43 | 2,16 | 2,89 | 3,63 | 4,36 | 5,11 | 5,86 |
| | $F_{ПС}$, кГс | 1,26 | 2,51 | 3,77 | 5,02 | 6,28 | 7,53 | 8,79 | 10,04 |
| $3^0$ | $F_{ЛС}$, кГс | 0,75 | 1,50 | 2,26 | 3,02 | 3,77 | 4,55 | 5,32 | 6,10 |
| | $F_{ПС}$, кГс | 1,32 | 2,64 | 3,96 | 5,27 | 6,59 | 7,91 | 9,23 | 10,54 |
| $4^0$ | $F_{ЛС}$, кГс | 0,78 | 1,56 | 2,35 | 3,14 | 3,94 | 4,73 | 5,54 | 6,34 |
| | $F_{ПС}$, кГс | 1,38 | 2,76 | 4,14 | 5,52 | 6,90 | 8,28 | 9,66 | 11,04 |
| $5^0$ | $F_{ЛС}$, кГс | 0,81 | 1,62 | 2,44 | 3,26 | 4,08 | 4,91 | 5,74 | 6,58 |
| | $F_{ПС}$, кГс | 1,44 | 2,88 | 4,32 | 5,76 | 7,20 | 8,64 | 10,08 | 11,52 |

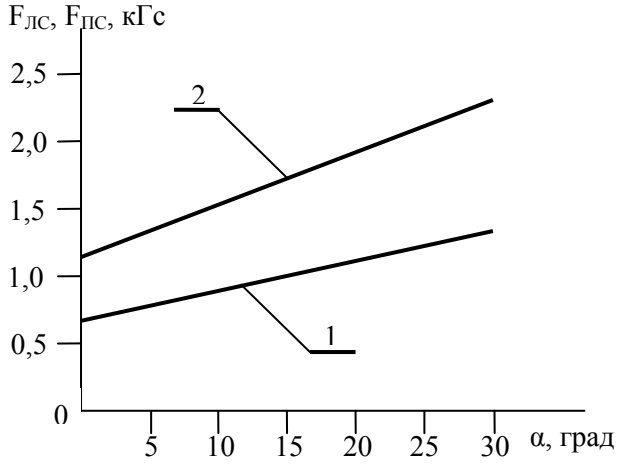



Рис. 6. Зависимость от угла атаки при скорости движения БЛА 20 км/ч: 1 - лобового сопротивления и 2 – подъемной силы

При запуске с рук скорость движения БЛА малая и составляет не более 20 км/ч. При такой скорости движения БЛА не падает, а достаточно заметно провисает на угол более $30^0$. Изменение лобового сопротивления и подъемной силы летающего крыла при скорости движения 20 км/ч приведено на рис. 6. Получается, что при тяге двигателя более 1,5 кГс БЛА должен заметно провисать, но будет удерживаться в полете и набирать соответственно скорость движения.

Для управления полетом служат закрылки. Рассмотрим работу закрылок.

**Моменты сил, создаваемые закрылками.** Общая схема расположения закрылок на БЛА показана на рис. 7. Закрылки можно полагать плоскими. Поэтому центробежными силами для закрылок можно пренебречь. Силы, возникающие вследствие действия уравнения Бернулли, возникают сверху и снизу. Поэтому следует учитывать их разность. В результате на закрылки действуют две силы: ударное воздействие молекул воздуха и разность сил, обусловленных уравнением Бернулли.

Ударное воздействие определяется изменением скорости при упругом ударе с зеркальным отражением. Тогда при скорости движения летающего крыла $v_x$ сила действия потока воздуха определяется изменением импульса за время взаимодействия, т.е.:

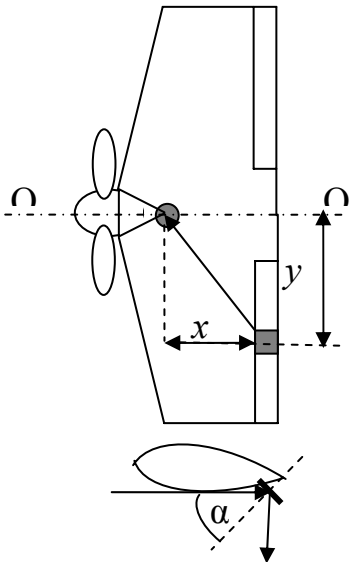



Рис. 7 . Общая схема БЛА с летающим крылом

$$\Delta F_{уд.} = 2\rho \Delta x \Delta y v_x^2 \cos^2(\alpha). \quad (48)$$

Составляющая скорости вдоль поверхности закрылка равна:

$$\Delta v_\tau = v_x \sin^2(\alpha). \quad (49)$$

Наличие такой скорости приводит к уменьшению давления у поверхности закрылка в соответствии с уравнением Бернулли. Это приводит к возникновению дополнительного давления на закрылки и соответственно к дополнительной силе действия на закрылки, равной:

$$\Delta F_Б = 0{,}5\rho v_x^2 \Delta x \Delta y \sin^2(\alpha). \quad (50)$$

Результирующая сила действия на каждый закрылок составит:

$$\Delta F_{закр.} = \Delta F_{уд.} + \Delta F_Б. \quad (51)$$

Действие той силы относительно центра тяжести формирует крутящие моменты сил вокруг оси симметрии $OO'$

$$\Delta M_y = \Delta F_{закр.} y \quad (52)$$

и опрокидывающий момент перпендикулярно оси симметрии $OO'$

$$\Delta M_x = \Delta F_{закр.} x. \quad (53)$$

Результирующие моменты сил относительно осей *X*-ов и *У*-ов получаются путем интегрирования по оси *У*-ов, а именно:

$$M_y = \int_l^L \Delta F_{закр.} y dy; \quad M_x = \int_l^L \Delta F_{закр.} x dy, \quad (54)$$

где $l$ – расстояние от оси симметрии крыла до начала закрылка и $L$ – размер крыла относительно оси симметрии.

На моменты сил, обусловленных закрылками, накладываются моменты сил, которые возникают при газодинамическом обтекании вследствие неравномерного распределения по площади крыла подъемной силы. Для осесимметричного крыла действие моментов сил по оси Y-ов взаимно компенсируются, а относительно оси X-ов при смещении максимума распределения подъемной силы вдоль оси X-ов возникают опрокидывающие моменты сил, равные следующей разности:

$$M'_x = \int_0^{l_{ЦТ.} tg(\chi)} \int_0^{l_{ЦТ.}} \Delta F_{ПС}(x,y) x dx dy - \int_{l_{ЦТ.} tg(\chi)}^{L_{КР}} \int_{l_{ЦТ.}}^{L_{КР.}} \Delta F_{ПС}(x,y) x dx dy, \quad (55)$$

где $l_{ЦТ.}$ – расстояние от винта до центра тяжести, $\chi$ – угол скоса крыла и $L_{КР.}$ – длина крыла по оси симметрии.

Таким образом, по разработанной методике производится полный аэродинамический расчет полета БЛА с заданным летающим крылом и кроме этого создается программное обеспечение для компьютерного моделирования реального полета БЛА, а на этой основе выясняются опасные маневры рассматриваемого БЛА.

## Список литературы

1. *Гречихин Л. И.* Подъемная сила крыла самолета и его лобовое сопротивление / Доклады VII международной научно-технической конференции «Кибернетика и высокие технологии XXI века» 16-18 мая 2006 г. г. Воронеж – Воронеж: Изд. ВГУ, 2006. Т. 1. С. 423-428.

2. *Гречихин Л. И.* Современная аэродинамика полета летательных аппаратов и возможности компьютерного моделирования /Матеріалы VIII Міжнародноі науково-технічноі конференціі “ABIA-2007” 25-27 квітня 2007 - Київ: НАУ, 2007. Т. 2. С. 33.95-33.104.

УДК 681.3

*В.В. Митюков*
*(Ульяновское высшее авиационное училище гражданской, авиации (институт), Российская Федерация)*

# ПРОГРАММНОЕ СРЕДСТВО ДЛЯ ИНТЕРАКТИВНОЙ АППРОКСИМАЦИИ СПЛАЙНАМИ ГРАФИЧЕСКИ ЗАДАННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

*В задачах математического моделирования нередко возникает необходимость аналитического представления некоторых зависимостей, заданных дискретно или графически. Предложен подход к аппроксимации таких зависимостей, путем визуальной обводки их сплайнами, включенными в панель рисования пакета MS Office.*

Задачи компьютерного моделирования непосредственно связаны с необходимостью интерполяции и аппроксимации различных данных и зависимостей, представленных в графическом виде. Например, если требуемая зависимость получена в результате сложных экспериментов или громоздких расчетов. В работе рассматривается задача аппроксимации графически заданных кривых линий, путем интерактивного перерисовывания сплайнов.

Математически сплайны состоят из алгебраических полиномов *n*-ой степени [1], состыкованных между собой с заданной степенью гладкости. В приложениях MS Office используется стандартная, встроенная в ОС Windows функция Безье, рисующая кубический параметрический сплайн, составленный из плоских фрагментов вида:

$$\mathbf{r}(u) = \mathbf{p}_0 \cdot (1-u)^3 + \mathbf{p}_1 \cdot 3 \cdot u\,(1-u)^2 + \mathbf{p}_2 \cdot 3 \cdot u^2\,(1-u) + \mathbf{p}_3 \cdot u^3 \qquad (1)$$

**или в координатной форме:**

$$\begin{Bmatrix} x(u) \\ y(u) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{Bmatrix} \cdot (1-u)^3 + \begin{Bmatrix} x_1 \\ y_1 \end{Bmatrix} \cdot 3 \cdot u\,(1-u)^2 + \begin{Bmatrix} x_2 \\ y_2 \end{Bmatrix} \cdot 3 \cdot u^2\,(1-u) + \begin{Bmatrix} x_3 \\ y_3 \end{Bmatrix} \cdot u^3$$

где параметр ($u$) задан в интервале [0, 1].

Перетаскивание меток–манипуляторов в большинстве графических программ, позволяет интерактивно изменять векторные коэффициенты (точки) $\mathbf{p}_0$, $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$, $\mathbf{p}_3$, задающие вид фрагмента сплайна, добиваясь его наилучшего совпадения с плоским фрагментом отсканированного изображения кривой линии. Сначала задаются концевые точки $\mathbf{p}_0$ и $\mathbf{p}_3$, и, затем, перемещением точек $\mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_2$, задающих направления желаемых концевых касательных, подбирается нужная форма этой кривой [1]. Для выполнения всех этих манипуляций вполне достаточно средств стандартной панели инструментов «Рисование» пакета MS Office (автофигуры «Линия» или «Кривая»). После масштабирования полученных точек $\mathbf{p}_0$, $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$, $\mathbf{p}_3$ по осям координат и подстановки полученных координат в уравнение (1), можно легко вычислить координаты любой промежуточной точки фрагмента сплайна.

***В задачах моделирования может потребоваться другое представление кубического фрагмента сплайна r(u), например, в виде алгебраического полинома:***

$$\mathbf{r}(u) = \mathbf{c}_0 + \mathbf{c}_1 \cdot\cdot u + \mathbf{c}_2 \cdot\cdot u^2 + \mathbf{c}_3 \cdot\cdot u^3$$

Путем сопоставления уравнений кривой $\mathbf{r}(u)$, в форме полинома и в форме Безье (1), устанавливаются соотношения между наборами векторов $\mathbf{p}_0$, $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$, $\mathbf{p}_3$ и $\mathbf{c}_0$, $\mathbf{c}_1$, $\mathbf{c}_2$, $\mathbf{c}_3$:

$$\begin{aligned} \mathbf{c}_0 &= \mathbf{p}_0 & \mathbf{p}_0 &= \mathbf{c}_0 \\ \mathbf{c}_1 &= 3 \cdot (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0) & \mathbf{p}_1 &= \mathbf{c}_0 + \tfrac{1}{3} \cdot\cdot \mathbf{c}_1 \\ \mathbf{c}_2 &= 3 \cdot (\mathbf{p}_2 - 2 \cdot \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_0) & \mathbf{p}_2 &= \mathbf{c}_0 + \tfrac{2}{3} \cdot \mathbf{c}_1 + \tfrac{1}{3} \cdot\cdot \mathbf{c}_2 \\ \mathbf{c}_3 &= \mathbf{p}_3 - 3 \cdot \mathbf{p}_2 + 3\,\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0 & \mathbf{p}_3 &= \mathbf{c}_0 + \mathbf{c}_1 + \mathbf{c}_2 + \mathbf{c}_3 \end{aligned} \qquad (2)$$

В задачах аппроксимации в качестве независимой переменной чаще всего служит одна из координатных осей ($x$), которая наряду с остальными координатами в (1), зависит от параметра $u \rightarrow x(u)$. Для вычисления зависимой от $x$ переменной – $y(u(x))$ в общем случае требуется определение обратной функции $u(x)$. Можно предложить два следующих подхода к решению такой задачи:

Первый подход состоит в том, что получение обратной функции $u(x)$ существенно упрощается, если прямая зависимость $x(u)$ линейная. Этого можно добиться путем некоторого ограничения на произвольное изменение промежуточных точек $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$ при подгонке формы кривой $\mathbf{r}(u)$. Проекции точек $\mathbf{p}_0$, $\mathbf{p}_1$, $\mathbf{p}_2$, $\mathbf{p}_3$ на выбранную координатную ось $x$ соответствуют значениям $x_0$, $x_1$, $x_2$, $x_3$. Тогда пропорциональность изменения переменной ($x$) на интервале $[x_0, x_3] = [a, b]$ и параметра ($u$) в интервале [0, 1] будет обеспечиваться следующей линейной зависимостью:

$x(u) = a + \cdot(b - a)\cdot u$ (отображение параметра $u$ в переменную $x$)

или $x_0\cdot(1-u)^3 + x_1\cdot 3\cdot u\,(1-u)^2 + x_2\cdot 3\cdot u^2\,(1-u) + x_3\cdot u^3 = a + \cdot(b - a)\cdot u$

Отсюда, приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях параметра $u$, нетрудно получить следующие 4 соотношения:

$$x_0 = a, \qquad x_1 = a + \frac{1}{3}\cdot(b - a), \qquad x_2 = a + \frac{2}{3}\cdot(b - a), \qquad x_3 = b \qquad (3)$$

Таким образом, для линейности отображения между интервалами $[x_0, x_3]$ и [0, 1], требуется дополнительно выполнить условие деления отрезка $[x_0, x_3]$ проекциями двух промежуточных точек $\mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_2$ на 3 равные части.

Другим решением может служить вычисление зависимой переменной ($y$) из условия выполнения в точках сплайна некоторых соотношений. Поскольку точки $\mathbf{p}_0$ и $\mathbf{p}_3$ лежат на концах сплайна, а точки $\mathbf{p}_1$ и $\mathbf{p}_2$ задают направления концевых касательных, то можно задать на концах сплайна 2 условия его совпадения с точками $\mathbf{p}_0$ и $\mathbf{p}_3$ и 2 условия совпадения производной $y'(x)$ с наклонами векторов $(\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0)$ и $(\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_2)$ к оси $x$ (задача Эрмита).

Предварительно принимается, что гладкое приближение $y(x)$ заданных дискретных значений, осуществляется *линейной* математической моделью:

$$y(x, C_j) = C_0\,\varphi_0(x) + C_1\,\varphi_1(x) + C_2\,\varphi_2(x) + C_3\,\varphi_3(x) \qquad (4)$$

где $C_j$ - искомые коэффициенты

$\varphi_j(x)$ - базисные функции (линейно-независимые)

Условия *интерполяции*, то есть условия точного выполнения равенств $y(x_k) = y_k$ и $y'(x_k) = y'_k$ в заданных точках $x_k$, ($k$ = 0, 3), приводят к системе четырех линейных уравнений с квадратной матрицей плана $\mathbf{P}$.

$$\begin{pmatrix} \varphi_0(x_0) & \varphi_1(x_0) & \varphi_2(x_0) & \varphi_3(x_0) \\ \varphi'_0(x_0) & \varphi'_1(x_0) & \varphi'_2(x_0) & \varphi'_3(x_0) \\ \varphi_0(x_3) & \varphi_1(x_3) & \varphi_2(x_3) & \varphi_3(x_3) \\ \varphi'_0(x_3) & \varphi'_1(x_3) & \varphi'_2(x_3) & \varphi'_3(x_3) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \\ y_3 \\ y'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_0 \\ \dfrac{(y_1 - y_0)}{(x_1 - x_0)} \\ y_3 \\ \dfrac{(y_3 - y_2)}{(x_3 - x_2)} \end{pmatrix} \qquad (5)$$

В отличие от первого подхода уже не требуется соблюдать полученные выше ограничения (3), для обеспечения линейности отображения параметра $u$ в независимую переменную $x$. Не требуются также предварительные выкладки вида (2), для преобразования коэффициентов различных базисных функций. Можно для уменьшения потери точности вообще исключить этап вычисления коэффициентов $C_j$, как это предложено в работе [3].

Для исследования и сравнения этих двух подходов была проведена программная реализация предложенных алгоритмов в офисной программе “MS Excel”. Подпрограммы и макросы для вычислений составлены на языке программирования VBA [2].

**На первом этапе загружается подготовленный рисунок, содержащий заданные графики. Средствами панели рисования создается и подбирается нужная форма рисуемого сплайна.**

На втором этапе выполняется макрос, вызывающий диалоговое окно «Аппроксимация» с двумя вкладками (Рис. 1.). На вкладке «Сплайн» выполняются вычисления для получения коэффициентов масштаба и отображения экранных координат четырех точек полученного сплайна в систему реальных координат. На вкладке «Расчеты» по этим реальным координатам рассчитываются коэффициенты для выбранной системы базисных функций.

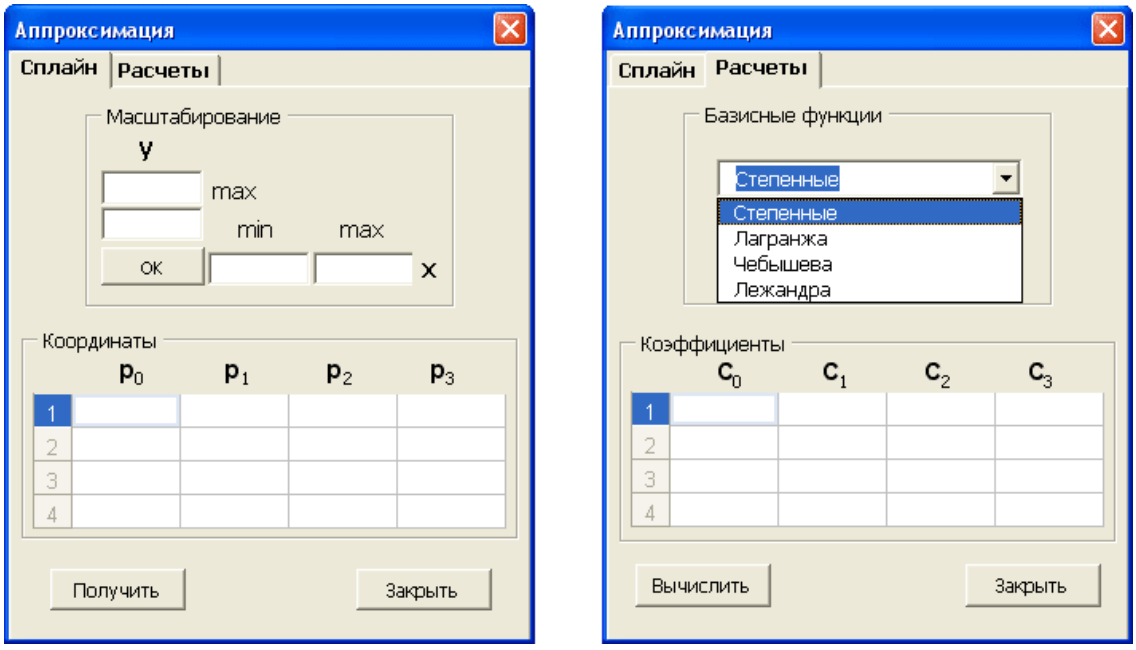



Рис. 1. Две вкладки диалогового окна для выполнения процесса аппроксимации.

## Выводы:

Путем подключения к средствам рисования MS Office небольшого дополнения, состоящего из макроса и нескольких подпрограмм,. получен программный инструмент для визуальной интерактивной аппроксимации графических зависимостей. Следует отметить, что наличие концевых касательных $y'(x)$, близких к вертикальным, приводит к получению коэффициентов, дающих искаженные результаты. Можно предложить растягивать участки оси $(x)$ таких зависимостей посредством некоторого промежуточного аналитического преобразования интервала $[x_0, x_3]$.

Аппроксимацию двумерной зависимости можно также свести к построению серии сплайнов по пространственным линиям, лежащим на некоторой порции поверхности.

## Список литературы

1. *Фокс А., Пратт М.* Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. -304 с.

2. *Васильев А., Андреев А.* VBA в Office 2000: учебный курс.– СПб.: Питер, 2001. –432 с.

3. *Митюков В.В.* Универсальное программное средство для задач интерполяции и аппроксимации. Інформаційно-діагностичні системи: Матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції “АВІА-2004”. –Т. 1. –К.: НАУ, 2004. с.14.39 - 14.42

УДК 517.5

*О.В. Карупу, кандидат фізико-математичних наук, доцент*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ОЦІНКИ ДЛЯ МОДУЛІВ ГЛАДКОСТІ ФУНКЦІЙ, ЩО ЗДІЙСНЮЮТЬ КОНФОРМНІ ВІДОБРАЖЕННЯ ОДНОЗВ'ЯЗНИХ ОБЛАСТЕЙ

*Розглянуто властивості конформних гомеоморфізмів, сформульовані у термінах рівномірних криволінійних модулів гладкості.*

й у комплексній площині задано однозв'язну область $G$, обмежену гладкою жордановою кривою $\Gamma$. Нехай $\tau = \tau(s)$ – кут між дотичною до $\Gamma$ та додатною дійсною віссю, $s = s(w)$ – довжина дуги на кривій $\Gamma$. Нехай $w = \varphi(z)$ – гомеоморфізм замкненого одиничного круга $\overline{D} = \{z : |z| \le 1\}$ на замикання $\overline{G}$ області $G$, конформний в $D$, а функція $z = \psi(w)$ – обернена до функції $w = \varphi(z)$.

Ставиться задача про отримання інформації про зв'язок між властивостями функції $\tau = \tau(s)$ та похідних функцій $w = \varphi(z)$ і $z = \psi(w)$ в термінах локальних модулів гладкості.

О.Д. Келлог [1] у 1912 році довів, що якщо функція $\tau = \tau(s)$ належить класу Гельдера з показником $\alpha$, $0 < \alpha < 1$, то тому ж класу належить і функція $\varphi'(e^{i\theta})$. Згодом у роботах багатьох авторів (С.Е. Варшавський, Я.Л Геронімус, С.Я.Альпер, П.М. Тамразов, Р.Н. Ковальчук, Л.І. Колесник) було отримано численні узагальнення цього результату. В дещо іншій постановці близькі задачі вивчалися в роботах Е.П. Долженка та В.А Данілова.

Зокрема, у роботах автора були отримані узагальнення та обернення теорем типу Келлога у термінах рівномірних криволінійних ([3] – [7]), локальних арифметичних та інтегральних модулів гладкості. При доведенні цих результатів суттєво використовуються оцінки П.М. Тамразова [8].

(Більш детально історію питання див. [2], [3] та [6]).

На спрямлюваних жорданових кривих П.М.Тамразовим [1] були введені криволінійні рівномірні модулі гладкості $\omega_k(f(z),\delta) = \sup\limits_{w\in\gamma}\ \sup\limits_{(z_0,\dots,z_k)\in\gamma_{w,\delta}(N)} \left|[z_0,\dots,z_k;f,z_0]\right|$, де $\gamma_{w,\delta}(N)$ - множина наборів $(z_0,\dots,z_k)$ таких, що криволінійні (відносно кривої $\gamma$) відстані між точками $z_0,\dots,z_k \in \gamma$ задовольняють умові $\rho(z_i,z_{i+1}) \Big/ \rho(z_j,z_{j+1}) \le N\ (N \in [1,\infty))$, а $\rho(z_i,w) \le \delta\ (i,j = 1,\dots,k)$, де $[z_0,\dots,z_k;f,z_0]$ – скінченна різниця порядку $k$ функції $w = f(z)$.

Модуль гладкості $\omega_k(f(z),\delta)$, що задовольняє умові $\omega_k(f(z),\delta) = O(\delta^\alpha)(\delta \to 0)$ $(0 < \alpha < k)$, будемо називати гельдеровим.

**Теорема 1.** ([3]). Нехай арифметичний модуль гладкості $\omega_k(\tau(s),\delta)$ порядку k функції $\tau(s)$ задовольняє умові $\omega_k(\tau(s),\delta) = O[\omega(\delta)](\delta \to 0)$, де $\omega(\delta)$ – нормальна мажоранта, яка задовольняє умові

$$\int_0^l \frac{\omega(t)}{t}\,dt < +\infty .$$

Тоді рівномірний криволінійний модуль гладкості того ж порядку $k$ похідної $\varphi'(e^{i\theta})$ функції $\varphi(z)$ на $\partial D$ задовольняє умовам

$$\omega_k(\arg\varphi'(e^{i\theta}),\delta) = O[\mu(\delta)](\delta \to 0),$$
$$\omega_k(\log\varphi'(e^{i\theta}),\delta) = O[\mu^*(\delta)](\delta \to 0),$$

$$\omega_k(\varphi'(e^{i\theta}),\delta)=O\big[\mu^*(\delta)\big](\delta\to 0),$$

де

$$\mu(\delta)=\omega_k(\tau(s),\delta)+\sum_{j=1}^{k-1}\sum_{r_1=1}^{j-1}\dots\sum_{r_j=1}^{r_{j-1}-1}\big[\omega_k(\tau(s),\delta)\big]^{\frac{k-r_1}{k}}\times$$

$$\times\int_0^l\dots\int_0^l\frac{\big[\omega_k(\tau(s),x_j)\big]^{\frac{r_j}{k}}\prod_{i=2}^{j}\big[\omega_k(\tau(s),x_{i-1})\big]^{\frac{r_{i-1}-r_i}{k}}}{\prod_{p=1}^{j}x_p\left(1+\left(x_p/x_{p-1}\right)^{r_p}\right)}dx_1\dots dx_j,$$

$$\mu^*(\delta)=\int_0^l\frac{\omega_k(\tau(s),x_1)}{x_1\left(1+\left(x_1/\delta\right)^k\right)}dx_1+$$

$$+\sum_{j=1}^{k-1}\sum_{r_1=1}^{j-1}\dots\sum_{r_j=1}^{r_{j-1}-1}\int_0^l\dots\int_0^l\frac{\big[\omega_k(\tau(s),x_j)\big]^{\frac{r_j}{k}}\prod_{i=2}^{j}\big[\omega_k(\tau(s),x_{i-1})\big]^{\frac{r_{i-1}-r_i}{k}}}{\prod_{p=1}^{j+1}x_p\left(1+\left(x_p/x_{p-1}\right)^{r_p}\right)}dx_1\dots dx_{j+1}.$$

**Наслідок 1.** У частинному випадку, коли арифметичний модуль гладкості $\omega_k(\tau(s),\delta)$ порядку $k$ функції $\tau(s)$ кривій $\Gamma$ задовольняє умові Гельдера з показником $\alpha$, $0<\alpha<k$: $\omega_k(\tau(s),\delta)=O\left(\delta^\alpha\right)(\delta\to 0)$, рівномірний криволінійний модуль гладкості $\omega_k(\varphi'(e^{i\theta}),\delta)$ того ж порядку $k$ похідної $\varphi'(e^{i\theta})$ функції $\varphi(z)$ на $\partial D$ задовольняє умові Гельдера з тим же показником $\alpha$: $\omega_k(\varphi'(e^{i\theta}),\delta)=O\left(\delta^\alpha\right)(\delta\to 0)$.

**Теорема 2.** ([4]) Нехай рівномірний криволінійний модуль гладкості похідної $\varphi'(e^{i\theta})$ функції $\varphi(z)$ на $\partial D$ задовольняє умові $\omega_k(\varphi'(e^{i\theta}),\delta)=O(\omega(\delta))(\delta\to 0)$, де $\omega(\delta)$ є нормальною мажорантою, що задовольняє умові $\int_0^l\frac{\omega(t)}{t}dt<+\infty$.

Тоді модуль гладкості $\omega_k(\tau(s),\delta)$ того ж порядку $k$ функції $\tau(s)$ на кривій $\Gamma$ задовольняє умові

$$\omega_k(\tau(s),\delta)=O\big(\mu(\delta)\big)(\delta\to 0),$$

де

$$\mu(\delta)=\omega(\delta)+\sum_{j=1}^{k-1}\left(1+\int_\delta^L\frac{\omega(t)}{t^{j+1}}dt\right)\times\delta^k\sum_{\substack{r_1,\dots,r_{k(r-1)/2}\ge 1\\ r_1+\dots+r_{k(r-1)/2}=k(k+1)/2-j}}\prod_{q=1}^{k(k-1)/2}(1+\int_\delta^L\frac{1}{t^{r_q+1}}(1+\int_t^L\frac{\omega(y)}{y^k}dy)dt).$$

**Наслідок 2.** У частинному випадку, коли рівномірний криволінійний модуль гладкості $\omega_k(\varphi'(e^{i\theta}),\delta)$ похідної $\varphi'(e^{i\theta})$ функції $\varphi(z)$ на $\partial D$ задовольняє умові Гельдера з показником $\alpha$, $0<\alpha<k$: $\omega_k(\varphi'(e^{i\theta}),\delta)=O\left(\delta^\alpha\right)(\delta\to 0)$, модуль гладкості $\omega_k(\tau(s),\delta)$ того ж порядку $k$ функції $\tau(s)$ на кривій $\Gamma$ задовольняє умові Гельдера з тим же показником $\alpha$: $\omega_k(\tau(s),\delta)=O\left(\delta^\alpha\right)(\delta\to 0)$.

Розглянемо оцінки для модулів гладкості похідної функції $z=\psi(w)$, що реалізує конформне відображення жорданової області $G$ на одиничний круг $D$.

**Теорема 3.** ([5]) Нехай модуль гладкості порядку $k$ функції $\tau(s)$ на кривій Γ задовольняє умові $\omega_k(\tau(s),\delta)=O[\omega(\delta)](\delta\to 0)$, де $\omega(\delta)$ є нормальною мажорантою, що задовольняє умові $\int\limits_0^l \frac{\omega(t)}{t}dt<+\infty$.

Тоді рівномірний криволінійний модуль гладкості того ж порядку $k$ похідної $\psi'(w)$ функції $\psi(w)$ на Γ задовольняє умовам

$$\tilde{\omega}_k(\arg\psi',\delta)=O\left(\tilde{\eta}(\delta)\right)(\delta\to 0),$$
$$\tilde{\omega}_k(\log\psi',\delta)=O\left(\tilde{\eta}*(\delta)\right)(\delta\to 0),$$
$$\tilde{\omega}_k(\psi',\delta)=O\left(\tilde{\eta}*(\delta)\right)(\delta\to 0),$$

де

$$\tilde{\eta}(\delta)=\tilde{\mu}(\delta)+\delta^{1-k(k-1)/2}\int\limits_\delta^l\frac{\tilde{\mu}(y)}{y^{k+1}}dy\left(\delta^k\int\limits_\delta^l\frac{\mu(t)}{t^k}dt\right)^{\frac{k(k+1)/2-1}{k}},$$

$$\tilde{\eta}*(\delta)=\tilde{\mu}*(\delta)+\delta^{1-k(k-1)/2}\int\limits_\delta^l\frac{\tilde{\mu}*(y)}{y^{k+1}}dy\left(\delta^k\int\limits_\delta^l\frac{\tilde{\mu}(t)}{t^k}dt\right)^{\frac{k(k+1)/2-1}{k}}.$$

**Наслідок 3.** У частинному випадку, коли модуль гладкості порядку $k$ функції $\tau(s)$ на кривій Γ задовольняє умові Гельдера з показником $\alpha$, $0<\alpha<k$: $\omega_k(\tau(s),\delta)=O\left(\delta^\alpha\right)(\delta\to 0)$, рівномірний криволінійний модуль гладкості того ж порядку $k$ похідної $\psi'(w)$ функції $\psi(w)$ на кривій Γ задовольняє умові Гельдера з тим же показником $\alpha$: $\tilde{\omega}_k(\psi',\delta)=O\left(\delta^\alpha\right)(\delta\to 0)$.

**Теорема 4.** Нехай модуль гладкості порядку $k$ функції $\tau(s)$ на кривій Γ задовольняє умові Гельдера $\omega_k(\tau(s),\delta)=O\left(\delta^\alpha\right)(\delta\to 0)$ з показником $\alpha$, $0<\alpha<k$.

Тоді рівномірний криволінійний модуль гладкості $\tilde{\omega}_k(\varphi,\delta)$ того ж порядку $k$ функції $\varphi(z)$ на $\partial D$ задовольняє умові

$$\tilde{\omega}_k(\varphi,\delta)=\begin{cases}O\left(\delta^{\alpha+1}\right)(\delta\to 0) & if \quad 0<\alpha<k-1,\\ O\left(\delta^k\log\frac{1}{\delta}\right)(\delta\to 0) & if \quad \alpha=k-1,\\ O\left(\delta^k\right)(\delta\to 0) & if \quad k-1<\alpha<k.\end{cases}$$

**Теорема 4.** ([6]) Нехай модуль гладкості порядку $k$ функції $\tau(s)$ на кривій Γ задовольняє умові Гельдера $\omega_k(\tau(s),\delta)=O\left(\delta^\alpha\right)(\delta\to 0)$ з показником $\alpha$, $0<\alpha<k$.

Тоді рівномірний криволінійний модуль гладкості $\tilde{\omega}_k(\psi,\delta)$ того ж порядку $k$ функції $\psi(w)$ на Γ задовольняє умові

$$\tilde{\omega}_k(\psi,\delta)=\begin{cases}O\left(\delta^{\alpha+1}\right)(\delta\to 0) & if \quad 0<\alpha<k-1,\\ O\left(\delta^k\log\frac{1}{\delta}\right)(\delta\to 0) & if \quad \alpha=k-1,\\ O\left(\delta^k\right)(\delta\to 0) & if \quad k-1<\alpha<k.\end{cases}$$

**Теорема 6.** ([7]) Нехай $G_1$ та $G_2$ – однозв'язні області в комплексній площині, обмежені гладкими жордановими кривими $\Gamma_1$ та $\Gamma_2$. Нехай $\tau_1(s_1)$ – кут між дотичною до кривої $\Gamma_1$ та додатною дійсною віссю, $s_1(\zeta)$ – довжина дуги на кривій $\Gamma_1$. Нехай $\tau_2(s_2)$ – кут між дотичною до кривої $\Gamma_2$ та додатною дійсною віссю, $s_2(w)$ – довжина дуги на кривій $\Gamma_2$. Нехай $w = f(\zeta)$ – гомеоморфізм замикання $\overline{G_1}$ області $G_1$ на замикання $\overline{G_2}$ області $G_2$, конформний в області $G_1$.

Нехай арифметичні модулі гладкості $\omega_k(\tau_1(s_1),\delta)$ та $\omega_k(\tau_2(s_2),\delta)$ порядку $k$ $(k \in N)$ функцій $\tau_1(s_1)$ та $\tau_2(s_2)$ задовольняє умові Гельдера з однаковим показником $\alpha$, $0 < \alpha < k$.

Тоді рівномірний криволінійний модуль гладкості $\tilde{\omega}_k(f,\delta)$ функції $f(\zeta)$ на $\Gamma_1$ задовольняє умові

$$\tilde{\omega}_k(f,\delta) = \begin{cases} O\left(\delta^{\alpha+1}\right)(\delta \to 0) & if \quad 0 < \alpha < k-1, \\ O\left(\delta^k \log\frac{1}{\delta}\right)(\delta \to 0) & if \quad \alpha = k-1, \\ O\left(\delta^k\right)(\delta \to 0) & if \quad k-1 < \alpha < k. \end{cases}$$

Доведення теореми 6 базується на теоремах 4 і 5 та оцінках скінченних різниць суперпозиції функцій.

## ВИСНОВКИ

Отримано інформацію про зв'язок між властивостями похідних довільного порядку функції $\tau = \tau(s)$ та функцій $z = \psi(w)$ і $w = \varphi(z)$ для рівномірних криволінійних модулів гладкості довільного порядку.

### Список літератури


1. *O. D. Kellog,* Harmonic functions and Green's integral, Trans Amer Math. Soc., **13** (1912), 109 – 132.

2. *Тамразов П. М.* Гладкости и полиномиальные приближения. Наукова думка. Киев. 1975.-274 с.

3. *Каруну О. В.* О модулях гладкости конформных отображений.//Укр. матем. журн., т. 30, №4, 1978, с.540-545.

4. *Каруну О. В.* Про деякі властивості модулів гладкості конформних відображень. //Праці Ін-ту математики НАН України, т. 31, Київ, 2000, с.237-243.

5. *Karupu O. W.* Скінченно-різницеві властивості конформних відображень, //Праці Ін-ту математики НАН України, т. **3** (2006), № 4, 175 – 180 .[

6. *Karupu O. W.* On properties of moduli of smoothness of conformal mappings. In: Complex Analysis and Potential Theory, *Proceedings of the Confertence Satellite to ICM 2006*, 231 – 238. World Scientific, Singapore, 2007.

7. *Karupu O. W.* On some finite-difference properties of conformal Mapping. 12 Міжнародна наукова конференція ім.академіка М.Кравчука, 15 – 17 травня 2008 р., Київ. Матеріали конференції, т.1. Вид. НТУУ "КПІ". – 2008, с. 642.

8. *Тамразов П. М.* Конечно-разностные тождества и оценки модулей гладкости суперпозиций функций. Препринт Ин-та математики АН УССР ,77.5, К., 1977, 24 с.

УДК 621.791.001.2

*В.Г. Демидко, канд. техн. наук, доцент*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ІНФОРМАТИВНІСТЬ ДЕФЕКТОСКОПІЇ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

**Вступ**

Сучасними є проблеми управління якістю продукції на різних етапах її виготовлення та експлуатації. Науково обґрунтована система управління якістю передбачає використання інформації про результати дефектоскопії як для визначення досягнутого рівня якості, так і для його підвищення. При вибірковому контролі якості, обробка цієї інформації для прийняття рішень по управлінню якості можлива при використанні теорії ймовірностей та математичної статистики. В 1947-1948 роках американський математик і інженер ввів поняття інформативності зв'язку.

**Метою** даної роботи є дослідження інформативності дефектоскопії деталей та вузлів авіаційної техніки.

**Розробка математичної моделі інформативності методів неруйнівного контролю**

У більшості випадків конструкція агрегатів літального апарату така, що не дає можливості всебічного доступу для неруйнівного контролю найбільш відповідальних елементів конструкцій. Тому при сертифікації агрегатів літаків користуються урізаною інформацією, яка не в повній мірі охоплює кількісні оцінки якості елементів їх конструкцій.

Внаслідок цього оцінки якості елементів конструкцій авіаційної техніки мають імовірнісний характер, що дає підставу для тлумачення стану об'єктів контролю, як невизначено і кількісно оцінювати його через так звану ентропію $H(K)$, де $K$ – стан об'єкту після контролю.

Другими словами інформація про стан контролює мого об'єкту є функцією ентропії $H$, або міри ступеня невизначеності якості при проведенні контролю різними фізичними методами з різними ймовірностями вияву газових пор, шлакових включень, тріщин та інших дефектів. Важлива саме чисельна оцінка ступеню не визначення різних випробувань для їх порівняння. Якщо при випробуванні можливі $k$ рівно ймовірних результатів, то чисельна характеристика ентропії є функцією числа $k$. При двох незалежних випробуваннях $\acute{a}$ і $\beta$ відповідно з $k$ і $l$ можливих результатах, складене випробування $\acute{a}\beta$ має $kl$ рівно можливих результатів, тобто міра невизначеності випробування $\acute{a}\beta$ дорівнює сумі ентропій $\acute{a}$ і $\beta$:

$$H(kl) = H(k) + H(l). \qquad (1)$$

Єдиною функцією аргументу $k$, що задовольняє умові (1) є логарифмічна, тобто $log(kl) = log\ k + log\ l$, тоді загальна невизначеність випробування $\acute{a}$ дорівнює $log\ k$, а кожний окремий результат, що має ймовірність $\frac{1}{k}$ має невизначеність $\frac{1}{k} log\, k = -\frac{1}{k} log \frac{1}{k}$.

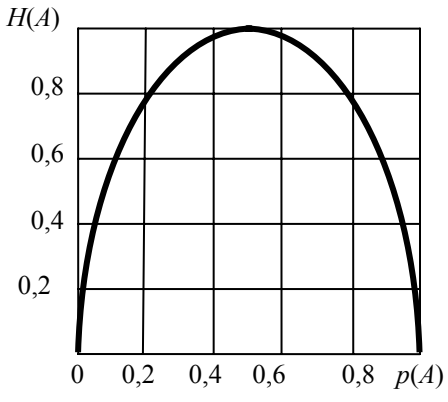



**Рис.1**

Вибір основи логарифму не є суттєвим, тому що за властивістю логарифмів $log_a k = \frac{log_b k}{log_b a}$ і перехід від однієї основи до другої зводиться тільки до множення функції $H(k) = log_a k$ на постійний множник $log_b a$, тобто рівносильний зміні одиниці вимірювання ступеню невизначеності. В інженерних застосуваннях частіше використовуються логарифми за основою два. Це значить, що за одиницю вимірювання ступеню не визначення

приймається невизначеність випробування, що може мати два різних результати. Графік залежності ентропії $H$ від ймовірності $p$ зображений на рис 1.

Порівняння ентропій можливе при виборі методу неруйнівного контролю. Наприклад, якщо при ультразвуковому (УЗК) та електромагнітному (ЕМК) методах контролю зварювального з'єднання ймовірності визначення типу дефекта наведені в таблиці 1, то відповідні ентропії дорівнюють:

*Таблиця.*1

| Тип дефекту | Газова пора | Шлакове включення | Тріщина |
|---|---|---|---|
| Ймовірність ідентифікації при УЗК | 0,25 | 0,25 | 0,5 |
| Ймовірність ідентифікації при ЕМК | 0,4 | 0,4 | 0,2 |
| Ймовірність появу дефекту за статистичними даними | 0,8 | 0,1 | 0,1 |

$$H(\text{УЗК}) = 2(-0{,}25\ lg0{,}25) - 0{,}5\ lg0{,}5 \approx 0{,}4515;$$
$$H(\text{ЕМК}) = 2(-0{,}4\ lg0{,}4) - 0{,}2\ lg0{,}2 \approx 0{,}4581.$$

З наведених обчислень видно, що електромагнітний метод має більшу невизначеність за ультразвуковий.

Кількість інформації (інформативність) $I$ це різниця ентропій отриманій при проведенні даного випробування та попереднього, результати якого відомі.

Наприклад, якщо відома статистика наведених вище дефектів за попередніми дослідженнями аналогічних з'єднань іншими методами контролю (останній рядок таблиці), то ця ентропія

$$H(\text{Ст}) = 2(-0{,}1\ lg0{,}1) - 0{,}8\ lg0{,}8 \approx 0{,}2768$$

Далі кількість інформації при УЗК та ЕМК відповідно дорівнюють $W_c$

$$I(\text{УЗК}) = 0{,}4515 - 0{,}2768 = 0{,}1747;$$
$$I(\text{ЕМК}) = 0{,}4581 - 0{,}2768 = 0{,}1813.$$

Якщо ймовірності вияву тріщин при рентгенографії (РГК) та УЗК дорівнюють $p_1 = 0{,}8$ і $p_2 = 0{,}5$ то відповідні ентропії

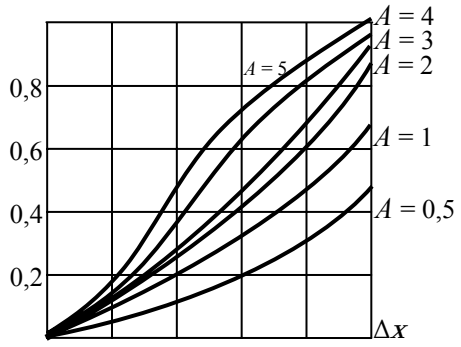
$$H(\text{РГК}) = 2(-0{,}5\ lg0{,}5) = 1;$$
$$H(\text{УЗК}) = -0{,}8\ lg0{,}8) - 0{,}2\ lg0{,}2 \approx 0{,}719.$$

Кількість інформації при комплексному контролі дорівнюватиме:

$$I = 1 - 0{,}719 = 0{,}281.$$

Для розрахунку ймовірності вияву дефектів використовують відношення сигнал/шум. Наприклад при радіографії це відношення дорівнює [2]:

$$k = \frac{\Delta D}{\sigma} = f\frac{|\gamma - \gamma_1|}{\gamma}\Delta x\sqrt{S}, \qquad (2)$$




| Де-фект | $\Delta x_{\min}$ | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ГП, $\gamma_1 = 0$ | 0,1 | 0 | 0,07 | 0,14 | 0,21 | 0,28 | 0,35 |
| | 0,2 | 0 | 0,14 | 0,28 | 0,42 | 0,56 | 0,7 |
| | 0,3 | 0 | 0,21 | 0,42 | 0,63 | 0,84 | 1,05 |
| | 0,4 | 0 | 0,28 | 0,56 | 0,84 | 1,12 | 1,4 |
| | 0,5 | 0 | 0,35 | 0.7 | 1,05 | 1,4 | 1,75 |
| | 0,6 | 0 | 0,42 | 0,84 | 1,26 | 1,68 | 2,1 |
| ШВ, $\gamma_1 = 2{,}7 г/см^3$ | 0,1 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| | 0,2 | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
| | 0,3 | 0 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,5 |
| | 0,4 | 0 | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2 |
| | 0,5 | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 |
| | 0,6 | 0 | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 3 |
| ВВ, $\gamma_1 = 19{,}34 г/см^3$ | 0,1 | 0 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 |
| | 0,2 | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| | 0,3 | 0 | 0,15 | 0,3 | 0,45 | 0,6 | 0,75 |
| | 0,4 | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1 |
| | 0,5 | 0 | 0,25 | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,25 |
| | 0,6 | 0 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1.2 | 1,5 |

Рис.2

де $\Delta D$ – додана щільність потемніння знімку, яка обумовлена наявністю дефекту; $\sigma$ - стандартне відхилення щільності потемніння знімку; *f*- фактор виявлення, що залежить від режиму радіографії; $\gamma$, $\gamma_1$- щільність контролюємого матеріалу і матеріалу в дефекті, відповідно; $\Delta x$ - променевий розмір дефекту; *S*- площа зображення дефекту на знімку. Для газових пор (ГП) коефіцієнт дорівнює одиниці, оскільки $\gamma >> \gamma_1$. Для шлакових включень (ШВ) значення коефіцієнту зменшується до 0,7, а для вольфрамових включень (ВВ) зростає до 1,49.

Таким чином, при однакових геометричних розмірах дефекту найбільше значення відношення сигнал/шум а, відповідно, і найбільшу ймовірність вияву мають вольфрамові включення.

Співвідношення (2) дозволяє пояснити вплив орієнтації дефекту на його виявлення. Відомо, що найбільш сприятливою є така орієнтація, при якій максимальний розмір дефекту співпадає з променевим. У результаті при постійних його розмірах величина $\Delta x\sqrt{S}$ залежить від орієнтації дефекта. На рис.2 показана залежність імовірності вияву *W* реальних дефектів в елементах конструкцій із сталі ($\gamma$ = 7,88 *г/см*$^3$) від променевого розміру дефекту $\Delta x$ (*мм*) при різних значеннях площі проекції дефекту на площу знімку *A*(*мм*$^2$).Масштаб по осі $\Delta x$ вибирається у відповідності з променевим розміром $\Delta x_{\min}$ карнавочного еталонного дефекту площею 5 *мм*$^2$.

Для оцінки достовірності вияву дефектів при ультразвуковому контролі (УЗК) найчастіше порівнюють дані УЗК з результатами руйнівних або інших неруйнівних методів досліджень.

При обробці даних УЗК та їх збігу з даними розкриття використовують двоїчні матриці достовірності контролю (табл.2).

*Таблиця.*2

| $P_{пр.р} = 1 - (\alpha_0 + \beta_0)$<br>$P_{пом} = \alpha_0 + \beta_0$ | Вскриття | |
|---|---|---|
| | Дефект є | Дефект відсутній |
| Ехо-сигнал був | $P_в = 1 - \beta_0$ | $\alpha_0$ |
| Ехо-сигналу не було | $\beta_0$ | $1 - \alpha_0$ |

У табл.2 $\alpha_0$ – відносна частота сторонніх сигналів; $\beta_0$ - відносна частота невиявлених дефектів; $P_в$ - відносна частота вірно виявлених дефектів; $P_{пр.р}$- відносна частота вірних рішень про наявність або відсутність дефектів; $P_{пом}$ - відносна частота помилкових рішень.

При обмеженій кількості випробувань і 100% УЗК критерієм вияву дефектів є відносна частота вірних рішень про наявність або відсутність дефектів, тобто

$$P_{пр.р} = 1 - (\alpha_0 + \beta_0);\ \alpha_0 = \frac{n_{пом}}{n_{заг} - n_д};\ \beta_0 = \frac{n_{пд}}{n_д},$$

де $n_{пом}$- кількість випробувань, при яких мали місце помилкові сигнали; $n_{заг} = \frac{L_0}{l_д}$ - загальна кількість вимірів при УЗК одиниці контролюємої продукції; $n_д$ - кількість дефектів, виявлених при руйнівних випробуваннях; $n_{пд}$ – кількість вимірювань, при яких були пропущені дефекти, $L_0$ – довжина контролюємого об'єкту; $l_д$ – ширина діаграми напрямку ультразвукового шукача.

Наприклад, при перебраковці $\alpha_0$ = 0,05 і недобраковці $\beta_0$ = 0,15 матриця достовірності контролю матиме вигляд (табл.3):

*Таблиця.*3

| $P_{пр.р}$ = 0,8<br>$P_{пом}$ = 0,2 | Вскриття | |
|---|---|---|
| | Дефект є | Дефект відсутній |
| Ехо-сигнал був | $P_в$= 0,85 | $\alpha_0$ = 0,05 |
| Ехо-сигналу не було | $\beta_0$ = 0,15 | 0,95 |

**Висновки**

На основі запропонованої математичної моделі розроблена методика розрахунку інформативності неруйнівних випробувань, якості елементів конструкцій авіаційної техніки. Визначені основні параметри, що впливають на об'єктивність контролю. Встановлена залежність імовірності вияву реальних дефектів від їх розмірів та орієнтації.

## Список літератури


1. *Волченко В.Н.* Контроль качества сварных конструкций. М.: Машиностроение, 1986, – 152с.

2. *Адаменко А.А., Демидко В.Г.* Качество радиационного контроля сварных соединений. К.: ИЭС им. Е.О.Патона, 1982.- 52с.

3. *Троицкий В.А., Радько В.П., Демидко В.Г.* Дефекты сварных соединений и средства их обнаружений. К.: Вища школа, 1983.-144 с.

4. *Яглом А.М., Яглом И.М.* Вероятность и информация. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1960. – 316с.

5. *Демидко В.Г.* Ймовірність вияву дефектів радіаційними методами в системі управління якістю авіаційної техніки. Матеріали 5 Міжнародної конференції „АВІА-2003".К.: НАУ, 2003, с. 14.241-14.244.

УДК 517.3+519.65

*Л.В. Рибачук, канд. фіз.-мат. наук*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ПРО ДРОБОВЕ ІНТЕГРО-ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ТРИГОНОМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ

*Розглянуто порівняння дробових похідних та інтегралів від тригонометричних функцій, обчислених за Ліувіллем, Ріманом-Ліувіллем, Адамаром та Вейлем; наведено деякі чисельні результати порівняння цих методів.*

Суттєвою особливістю дробового числення є можливість узагальнення багатьох математичних об'єктів і понять. Варто відзначити широку універсалізацію операцій дробового інтегро-диференціювання. Так, наприклад, операції диференціювання та інтегрування в дробовому аналізі є симетричними щодо знаку порядку похідної чи інтегралу і виконуються за одним алгоритмом, а звичайні (натуральні) інтеграли та похідні стають частинним випадком дробових аналогів.

Поняття дробового диференціювання та інтегрування звичайно пов'язують з ім'ям Ліувілля. Проте насправді ще засновники диференціального та інтегрального числення замислювалися над похідними не лише цілого, а і дробового порядку.

Дробові похідні привертали увагу Лейбніца, Ейлера, Ліувілля, Абеля, Рімана, Летнікова, Вейля, Адамара і багатьох інших відомих математиків, які значною мірою вплинули на розвиток дробового інтегро-диференціювання.

Дробове інтегро-диференціювання в наш час знаходить широке застосування в теорії диференціальних та інтегральних рівнянь, крайових задач математичної фізики, в теорії спеціальних функцій, теорії чисел, у багатьох галузях прикладної математики тощо.

Як відомо, в 1832-1837 рр. з'являється серія робіт Ж. Ліувілля, яка зробила його творцем достатньо повноцінної теорії дробового інтегро-диференціювання. Означення Ліувілля дробового диференціювання спершу було засноване на формулі диференціювання показникової функції і стосується функцій, що можуть бути подані у вигляді ряду

$$f(x)=\sum_{k=0}^{\infty}c_k e^{a_k x}\,.$$

Для таких функцій, за означенням Ліувілля, похідна довільного (в тому числі і комплексного) порядку $p$ визначається таким чином [1]

$$D^{-p}f(x)=\sum_{k=0}^{\infty}c_k a_k^p e^{a_k x}\,.$$

В тому ж 1832 році Ж. Ліувіллем було введено операцію інтегрування дробового порядку, яка визначається таким чином

$$I_{\alpha}^{-\infty}f=I_{\alpha}f=\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_{-\infty}^{x}\frac{f(t)}{(x-t)^{1-\alpha}}dt\,,\ (\alpha>0)\,.$$

У 1847 році Б. Ріманом дробове інтегрування було впроваджено таким чином

$$I_{\alpha}^{a}f=\frac{1}{\Gamma(\alpha)}\int_{a}^{x}\frac{f(t)}{(x-t)^{1-\alpha}}dt\,,\ (\alpha>0)\,.$$

У подальшому дробове інтегрування, що визначається цією формулою, отримало назву дробового інтегралу Рімана-Ліувілля.

Слід зауважити, що хоча робота Рімана, в якій було запропоновано цю формулу, було виконано ним у 1847 році, опубліковано її було лише у 1876 році – через 10 років після його смерті.

В 1867 році А. Грюнвальд і в 1868 році А.В. Летніков запропоновують інший підхід до

дробового інтегро-диференціювання, заснований на узагальнені звичайного диференціювання функції $f(x)$ порядку $n \in N$ у вигляді

$$f^{(n)}(x) = \lim_{h \to 0} \frac{(\Delta_h^n f)x}{h^n},$$

де $(\Delta_h^n f)x$ – скінченна різниця порядку $n \in N$ функції $f$ з кроком $h$. Різниця $(\Delta_h^\alpha f)x$ дробового порядку $\alpha \in R$, $\alpha > 0$, визначається рядом

$$(\Delta_h^\alpha f)x = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \binom{\alpha}{k} f(x - kh),$$

де $\binom{\alpha}{k}$ – біноміальні коефіцієнти, які для довільних дійсних чисел визначаються за формулами [2]

$$\binom{\alpha}{k} = \frac{\Gamma(1+\alpha)}{\Gamma(1+k)\Gamma(1+\alpha-k)}.$$

Похідні дробового порядку Грюнвальда-Летнікова визначаються таким чином

$$D^\alpha f(x) = \lim_{h \to 0} \frac{(\Delta_h^\alpha f)x}{h^\alpha}.$$

Відповідно, інтеграли дробового порядку визначаються формулами

$$D^\alpha f(x) = \lim_{h \to 0} h^\alpha (\Delta_h^{-\alpha} f)x.$$

Можна показати [1], що при певних обмеженнях інтеграли і похідні дробового порядку у розумінні Грюнвальда – Летнікова збігаються із відповідними інтегралами і похідними у розумінні Рімана-Ліувілля.

У 1892 році виходить змістовна робота Ж. Адамара. Ідея дробового диференціювання аналітичної функції через почленне диференціювання її ряду Тейлора, хоча і відома до Адамара, використовується в цій роботі як ефективно працюючий математичний апарат, усвідомлений як дробове диференціювання аналітичної в колі функції по радіусу. З того часу такий підхід прийнято називати підходом Адамара [1]. Згідно з Адамаром, якщо

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} f^{(k)}(c) \frac{(x-c)^k}{k!},$$

то дробова похідна визначається таким чином

$$D^\alpha f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{f^{(k)}(z_0)}{k!} \frac{\Gamma(k+1)}{\Gamma(k+1-\alpha)} (x-c)^{k-\alpha},$$

а дробове інтегрування – за формулою

$$I_\alpha^{A,c} f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} f^{(k)}(c) \frac{\Gamma(k)}{\Gamma(k+\alpha)} \frac{(x-c)^{k+\alpha}}{k!}.$$

В цій же роботі, напевне, вперше з'являється конструкція узагальненого дробового інтегрування у формі

$$\int_0^1 v(\xi) f(z\xi) d\xi.$$

Проте ця ідея Адамаром далі не розвивалася, хоча він і розглянув випадок

$$v(\xi) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} (-\ln \xi)^{\alpha-1}.$$

Безпосередньою перевіркою нескладно переконатися, що для функцій, які можуть бути подані рядами Тейлора, дробовий інтеграл Рімана – Ліувілля співпадає з дробовим інтегралом за Адамаром, тобто

$$I_\alpha^{A,0} f = I_\alpha^a f.$$

Звичайна форма дробового інтегрування за Ріманом – Ліувіллем виявляється незручною в теорії тригонометричних рядів, яка має справу з періодичними функціями. Природно, що для періодичних функцій операція дробового інтегро-диференціювання має бути введена таким чином, щоб вона переводила їх в періодичні функції з тим же періодом. Легко бачити, що дробове інтегро-диференціювання за Ріманом – Ліувіллем такої властивості не має. Дійсно, вирази для дробових похідних за Ріманом – Ліувіллем тригонометричних функцій $\sin\omega x$ та $\cos\omega x$ мають вигляд [2]

$$D^{\alpha}\sin\omega(x-a)=\sin\omega(x-a)\times\sum_{k=0}^{\infty}(-\omega^2)^k\binom{\alpha}{2k}\frac{(x-a)^{2k-\alpha}}{\Gamma(1+2k-\alpha)}+$$

$$+\omega\cos\omega(x-a)\times\sum_{k=0}^{\infty}(-\omega^2)^k\binom{\alpha}{2k+1}\frac{(x-a)^{1+2k-\alpha}}{\Gamma(2+2k-\alpha)};$$

$$D^{\alpha}\cos\omega(x-a)=\cos\omega(x-a)\times\sum_{k=0}^{\infty}(-\omega^2)^k\binom{\alpha}{2k}\frac{(x-a)^{2k-\alpha}}{\Gamma(1+2k-\alpha)}-$$

$$-\omega\sin\omega(x-a)\times\sum_{k=0}^{\infty}(-\omega^2)^k\binom{\alpha}{2k+1}\frac{(x-a)^{1+2k-\alpha}}{\Gamma(2+2k-\alpha)}.$$

Отже, обчислення дробових похідних та інтегралів за Ріманом – Ліувіллем (Адамаром) від тригонометричних функцій призводить до неперіодичних функцій.

В теорії тригонометричних рядів користуються іншим означенням дробового інтегро-диференціювання, запропонованим Г. Вейлем у 1917 році. Згідно з Вейлем, якщо

$$f(x)=\sum_{|n|>0}c_n e^{inx},\ \ (c_0=0).$$

то інтеграл Вейля порядку $\alpha$ $(\alpha>0)$, визначається таким чином

$$If_{\alpha}(x)=\sum_{|n|>0}\frac{c_n e^{inx}}{(in)^{\alpha}}.$$

Цей оператор при натуральних значеннях $\alpha$ являє собою $\alpha$-кратний інтеграл від функції $f(x)$, але інакше нормований, а саме вимогою, щоб функція $I_{\alpha}f$ мала період і щоб її середнє значення на періоді дорівнювало нулю.

Нескладно показати [3], що інтеграл Вейля можна подати у вигляді згортки

$$If_{\alpha}(x)=\frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi}f(x-t)\,\Psi^{\alpha}(t)\,dt,$$

де $\Psi^{\alpha}(t)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\cos\left(nx-\alpha\frac{\pi}{2}\right)}{n^{\alpha}}$.

В [1] показано, що для періодичних функцій з нульовим середнім дробові інтеграли Вейля співпадають з дробовими інтегралами Ліувілля на всій прямій, тобто

$$I_{\alpha}f=If_{\alpha}(x).$$

Нескладно показати, що обчислення дробових похідних та інтегралів від тригонометричних функцій за Вейлем (Ліувіллем) призводить до таких же тригонометричних функцій, зсунутих певним чином; при цьому зберігається властивість періодичності.

З цього можна зробити висновок, що втрата періодичності при виконанні операцій дробового інтегрування та диференціювання відбувається внаслідок виконання цих операцій саме у розумінні Рімана – Ліувілля (Адамара).

Природно виникає питання про те, наскільки відрізняються між собою похідні від тригонометричних функцій у розумінні Рімана –Ліувілля та Адамара від таких же похідних у

розумінні Ліувілля та Вейля. Можна показати, що відмінність між цими похідними оцінюється формулами

а) для $f(x)=\sin x$

$$\delta_s(x,\alpha)=I_\alpha^A f(x)-If_\alpha(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}}{(2n-1)!}\left[\frac{\Gamma(2n)}{\Gamma(2n-\alpha)}x^{2n-1-\alpha}-\left(x+\frac{\pi\alpha}{2}\right)^{2n-1}\right],$$

б) для $f(x)=\cos x$

$$\delta_c(x,\alpha)=I_\alpha^A f(x)-If_\alpha(x)=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^{n-1}}{\left[2(n-1)\right]!}\left[\frac{\Gamma(2n-1)}{\Gamma(2n-1-\alpha)}x^{2(n-1)-\alpha}-\left(x+\frac{\pi\alpha}{2}\right)^{2(n-1)}\right].$$

Графіки похибки $\delta_s(x,\alpha)$ для деяких значень параметра $\alpha$ наведено на рис. 1 – 3.

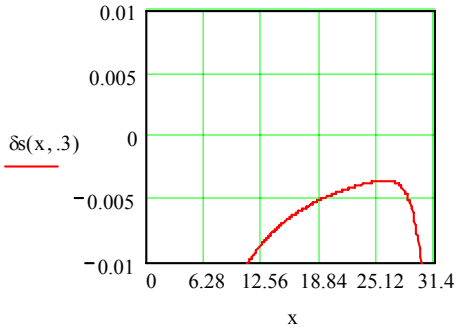



Рис. 1. Графік похибки $\delta_s(x,\alpha)$ для значення параметра $\alpha=0.3$

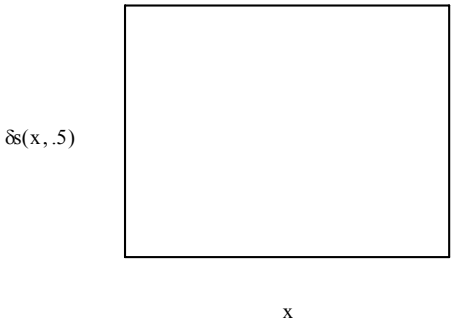



Рис. 2. Графік похибки $\delta_s(x,\alpha)$ для значення параметра $\alpha=0.5$ Аналогічно виглядають і графіки похибки $\delta_c(x,\alpha)$.

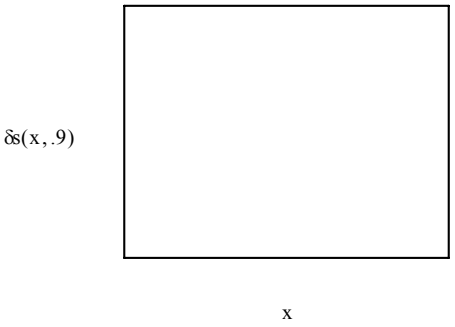



Рис. 3. Графік похибки $\delta_s(x,\alpha)$ для значення параметра $\alpha=0.9$

Легко бачити, що найменшого значення (менше за 0,5%) величини $\delta_s(x,\alpha)$ та $\delta_c(x,\alpha)$ приймають на проміжку $[6\pi, 8\pi]$. Це пояснюється тим, що з одного боку, при малих значеннях аргументу на значення величини негативно впливає близькість аргументу до нуля, а з другого боку, при великих значеннях аргументу, зростання цих величин пояснюється швидким накопиченням обчислювальної похибки. Найменших значень ці величини набувають при значеннях параметра $\alpha$, близьких до країв інтервалу $(0,1)$; при значеннях цього параметру, близьких до середини інтервалу, ця похибка є найбільшою і не перевищує 0.5%.

## Висновки

Спираючись на результати проведених досліджень можна зробити висновок про те, що результати дробового інтегро-диференціювання за Ріманом –Ліувіллем та Адамаром асимптотично наближаються до результатів дробового інтегро-диференціювання за Вейлем та Ліувіллем.

## Список літератури


1. *Самко С.Г., Килбас А.А., Маричев О.И.* Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. – Минск: Наука и техника, 1987. – 688 с.
2. *Вірченко Н.О., Рибак В.Я.* Основи дробового інтегро-диференціювання. – К.: ТОВ “Задруга”, 2007. – 364 с.
3. *Ахиезер Н.И.* Лекции по теории аппроксимации. – М.: Наука, 1965. – 408 с.

УДК 517.1 : 519.1

*О.Д. Глухов, канд. фіз.-мат. наук*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ЛЕМА ПРО ДОМІНАТОРИ В ДВОДОЛЬНИХ ГРАФАХ ТА ДЕЯКІ ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ

Нехай $G$ - дводольний граф - з множиною $G^0$ вершин і множиною $G^1$ ребер, $G^0 = X \cup Y$, $X \cap Y = \varnothing$, $G^1[X] = G^1[Y] = \varnothing$, $|X| = n$, $|Y| = m$. Лівим домінатором ( в подальшому просто домінатором) графа $G$ назвемо таку множину $A$ його вершин, що $A \subseteq X$ і $\forall y \in Y \; \exists x \in A : (x, y) \in G^1$; якщо при цьому $|A| = k$, то множину $A$ також будемо називати $k$- домінатором. Таким чином (лівий) домінатор дводольного графа $G$ – це така підмножина $A$ його лівої долі ($X$) , що кожна вершина з правої долі ($Y$) суміжна з принаймні з одною вершиною множини $A$.

**Лема про домінатори.**

Якщо $G$ - дводольний граф - з множиною $G^0$ вершин і множиною $G^1$ ребер, $G^0 = X \cup Y$, $X \cap Y = \varnothing$, $G^1[X] = G^1[Y] = \varnothing$, $|X| = n$, $|Y| = m$, $\forall y \in Y \; \rho(y) \geq np$, $p = 1 - m^{-1/k}$, $q = 1 - p$, $2 \leq k \leq nq$ , то $G$ має $k$- домінатор.

Доведення. Нехай граф $G$ задовольняє умовам леми. Виберемо довільну вершину $y \in Y$. Будемо говорити, що $k$-підмножина $F$ множини $X$ є домінатором для вершини $y \in Y$, якщо вершина $y$ суміжна принаймні з однією вершиною множини $F$. Число $s$ вершин з долі $X$, які не суміжні з даною вершиною $y \in Y$ не більше величини $\lfloor nq \rfloor$, а отже число $k$-підмножин множини $X$, які не є домінаторами для вершини $y$ не перевищує величини $\binom{s}{k}$.

Скористаємось відомою нерівністю для біноміальних коефіцієнтів[ 2 ]:

$$\binom{s}{k} < \binom{n}{k}\left(1 - \frac{n-s}{n-k}\right)^k \leq \binom{n}{k}\left(\frac{s}{n}\right)^k, \quad \text{де } 2 \leq k \leq s < n.$$

Враховуючи, що $s \leq nq$, $q^k = 1/m$, отримуємо нерівність: $\binom{s}{k} < \binom{n}{k} q^k \leq \frac{1}{m}\binom{n}{k}$.

Оскільки для кожної вершини $y \in Y$ число $k$-підмножин множини $X$, які не є її домінаторами менше ніж $\frac{1}{m}\binom{n}{k}$, то усього $k$-підмножин множини $X$, які не є домінаторами хоча б для однієї з вершин $y \in Y$, менше величини $\binom{n}{k}$ - числа усіх можливих $k$-підмножин множини $X$. Отже існує така $k$-підмножина $A \subseteq X$, що є домінатором для кожної вершини $y \in Y$ тобто є $k$- домінатором графа $G$, що і потрібно було довести.

Наступне твердження є наслідком леми про домінатори для випадку напіврегулярних дводольних графів, тобто таких двудольних графів, у яких степені вершин, що належать одній долі однакові (степені вершин лівої та правої долі можуть бути різними).

**Твердження1**. Якщо $G$ - напіврегулярних дводольний граф - з множиною $G^0$ вершин і множиною $G^1$ ребер, $G^0 = X \cup Y$, $X \cap Y = \varnothing$, $G^1[X] = G^1[Y] = \varnothing$, $|X| = n$, $|Y| = m$, $\forall x \in X \; \rho(x) = m - m^{(k-1)/k}$, $2 \leq k \leq m^{(k-1)/k}$ , то $G$ має $k$- домінатор.

Доведення. Якщо $G$ - напіврегулярних дводольний граф, то $|G^1| = n(m - m^{(k-1)/k})$, а тому $\forall y \in Y \; \rho(y) = n(m - m^{(k-1)/k})/m = n(1 - m^{-1/k})$, і отже можна застосувати вже доведену лему.

Ще один наслідок можна отримати, переформулювавши лему про домінатори в термінах покриття множини набором підмножин.

**Твердження 2**. Якщо множина $A$ покрита набором підмножин $\{A_i\}$, $A=\bigcup_{i=1}^{n} A_i$,

причому $|A|=m$, $\forall a\in A\,|\{A_i : a\in A_i\}|\ge np$, $p=1-m^{-1/k}$, $2\le k\le nq$, то серед даного набору знайдуться $k$ підмножин, які також покривають множину $A$.

Доведення очевидне.

Далі буде показано, як можна отримати теорему про транзитивні групи підстановок з роботи [ 1 ].

**Теорема 1**. Якщо група $H$ діє на множині $U$ транзитивно, $A\subset U$ і $|A|^{(k+1)/k}\le|U|$, $k\ge 1$, то знайдеться така множина $\{h_i\}_{i=0}^{k}$ елементів групи $H$, де $h_0$ – одиниця групи $G$, що $\bigcap_{i=0}^{k} h_i(A)=\varnothing$.

Доведення. Розглянемо наступний дводольний граф $G:\ Y=U,\ X=\{h(B): h\in H\}$, $B=U\mid A,\ G^1=\{(x,y): y\in x, x\in X, y\in Y\}$. За умовою теореми група $H$ діє на множині $U$ транзитивно, звідки випливає, що граф $G$ є напіврегулярним і. Легко підрахувати степені вершин долі $X$: $\forall x\in X\ \rho(x)=m-m^{k/(k+1)}$, де $m=|U|$. Застосуємо тепер твердження 1 (замінивши $k$ на $k+1$) і отримаємо, що для деяких $\{h_i\}_{i=0}^{k}$ елементів групи $H$: $\bigcup_{i=0}^{k} h_i(B)=U$, або $\bigcap_{i=0}^{k} h_i(A)=\varnothing$. Враховуючи, що група автоморфізмів графа $G$ діє транзитивно на кожній долі, можна вибрати в якості $h_0$ одиницю групи $G$. Таким чином теорема доведена.

Покажемо тепер, як використовуючи отримані результати можна довести існування так званих квазізбільшувачів. Нехай $G_n$ – граф на $n$ вершинах з множинами $G_n^0$ вершин і $G_n^1$ ребер. Валентністю графа будемо називати найбільшу степінь його вершин. Будемо також користуватися наступними позначеннями : $\rho(X, G_n) = |\{(xy):(xy)\in G_n^1, x\in X, y\notin X\}|$, $X\subset G_n^0$. Граф $G_{2n}$ назвемо $\alpha$-квазізбільшувачем, якщо для будь-якого $X\subset G_{2n}^0$, $|X|=n$, справедлива нерівність : $\rho(X, G_n)\ge\alpha n$, де $\alpha>0$ - деяка константа.

Зауважимо, що такі графи мають застосування в задачах забезпечення живучості і діагнозоспроможності складних технічних систем [3]. При цьому важливе значення має задача побудови квазізбільшувача при деяких обмеженнях на його структуру, зокрема, при умові, що його валентність(найбільша степінь вершини) не перевищує деякої константи, або при умові, що він містить заданий підграф.

Використаємо наступний спосіб конструювання графів, який називається “склейкою за допомогою перестановки” [ 1 ]. Нехай $G_{2n}$ - граф, на множині $\{1,2,\dots 2n\}$ вершин, $h$ – деяка перестановка цієї множини, $h(G_{2n})$–граф, що одержується із $G_{2n}$ перестановкою $h$ множини його вершин так, що якщо в графі $G_{2n}$ є ребро $(i,j)$, то в графі $g(G_{2n})$ є ребро $(h(i),h(j))$.

Визначимо новий граф $G_{2n}[h]$ на множині вершин $\{1,2,\dots 2n\}$, поклавши $(G_{2n}[h])^1 = G_{2n}^1 \cup (g(G_{2n}))^1$. В роботі [1] було показано, існування такої перестановки $h$, що граф $Z_{2n}[h]$ буде $\alpha$- к вазізбільшувачем ( для довільного $n$ і деякого фіксованого $\alpha > 0$ ), тобто що з двох екземплярів простого цикла $Z_{2n}$ можна "склеїти" квазізбільшувач. Застосовуючи лему про домінатори, можна довести наступне загальне твердження, яке дозволяє будувати квазізбільшувачі із заданими підграфами.

**Теорема 2**. Для довільного зв'язного графа $G_{2n}$ , $\left|G_{2n}^1\right| \le cn$ , $c$ - деяка стала , існує така константа $\alpha > 0$ ($\alpha$ залежить від $c$, але не залежить від $n$ ), що знайдеться така перестановка $g$ множини $G_{2n}^0$ його вершин, що граф $G_{2n}[h]$ буде $\alpha$-квазізбільшувачем для будь-яких досить великих $n$ .

Доведення. Якщо зафіксувати в графі $= G_{2n}$ певну вершину $x_0$ , то існуватиме бієкція між підмножинами $A \subset G^0, x_0 \in A$ , $\left|A\right| = n$ та $(n, n)$ – розрізами графа $G$, крім того неважко довести, що число таких підмножин $A \subset G^0, x_0 \in A$ , $\left|A\right| = n$, які задовольняють умові $\rho(A, G) < \alpha n$ не перевищує $\binom{cn}{\alpha n}$. Розглянемо тепер дводольний граф $F$, $F^0 = X \cup Y$, $X \cap Y = \varnothing$, $F^1[X] = F^1[Y] = \varnothing$, $X = \{h(G) : h \in S\}$, де $S$ – симетрична група перестановок на $G^0$ , ( тобто X це множина усіх графів, ізоморфних $G$ , що побудовані на множині $G^0$), $Y = \{A : A \subset G^0, x_0 \in A, \left|A\right| = n\}$, $F^1 = \{(h(G), A) : h(G) \in X, A \in Y, \rho(A, h(G)) \ge \alpha n\}$.

Для доведення теореми тепер достатньо врахувати, що для деякого α має місце нерівність: $\binom{cn}{\alpha n}^2 < \binom{2n}{n}$ і застосувати лему про домінатори .

**Список літератури**


1. *Глухов О.Д.* Про застосування груп перестановок в деяких комбінаторних задачах.- Укр. мат. журнал, т.60, №11, 2008, с.1568-1571.

2. *Erdös P., Renyi A.* On the existence factor of degree one of a connected random graph. Acta Math. Acad. Sci. Hungar., 17, 1966, p. 359-368.

3. *Глухов А.Д.* Диагнозоспособность, связностная функция и спектр графа. - Электронное моделирование, №2, 1995, с.92-94.

УДК: 519.6:533.6

*Г.В. Сандраков, доктор физико-математических наук*
*(Киевский национальный университет им. Т.Г. Шевченко, Украина),*
*С.Б. Бойко*
*(Таврический государственный агротехнологический университет, Украина)*

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ С ФАЗОВЫМИ ПЕРЕХОДАМИ

*Метод математического моделирования динамики неоднородной жидкости с учетом фазовых превращений будет представлен. Такой метод основывается на дискретизации законов сохранения массы, моментов и энергии. При численной реализации этого метода используется комбинирование метода крупных частиц и метода частиц в ячейках.*

Исследование и оптимизация механических и физико-химических процессов, происходящих в веществах при больших деформациях, высоких давлениях и фазовых превращениях, требуют достаточно точного определения давлений, температур и перемещений, возникающих в этих веществах. Определение значений таких величин возможно на основе математического и численного моделирования быстро протекающих нестационарных нелинейных процессов, описание которого будет приведено здесь. На данный момент в литературе практически не представлены методы расчетов многомерных нелинейных задач, описывающих поведение структурно-неоднородных материалов в области больших деформаций, высоких давлений и фазовых превращений, возникающих при прохождении сильных ударных волн.

Актуальность этой задачи обусловлена интенсивным развитием разделов физики и механики, связанных с изучением процессов, происходящих при прохождении сильных ударных волн в металлах, полимерах и других твердых телах [2]. Исследование и оптимизация таких процессов необходимы для развития новых технологий, использующих методы взрывного и ударного обжатия материалов, позволяющих синтезировать новые вещества и полимеры, например, искусственные алмазы из графита. Образование новых веществ их модификаций и фаз связано с физико-химическими процессами, инициируемыми сильными ударными волнами при высоких давлениях. Расчет таких волновых процессов усложняется, поскольку эти физико-химические процессы сильно влияют на поведение инициирующих ударных волн. Кроме того, фазовые переходы под действием ударного нагружения могут приводить к многофронтовым ударным волнам и к ударным волнам разгрузки. Для анализа этих процессов необходимы разработка математических моделей, учитывающих фазовые превращения, и построение соответствующих вычислительных алгоритмов.

Здесь будет представлен новый метод математического моделирования динамики структурно-неоднородных материалов в области больших деформаций и фазовых превращений. Таким образом, рассматривается метод математического моделирования динамики неоднородной жидкости с учетом фазовых превращений. Предполагается, что такая жидкость является сжимаемой и невязкой. Неоднородности жидкости рассматриваются как малые частицы или капли одной жидкости распределенной в другой (несущей) жидкости. Общее число таких частиц может быть достаточно большим, и эти частицы могут претерпевать фазовые превращения. Представляемый метод основан на дискретизации законов сохранения массы, моментов и энергии, записанных в интегральной и дифференциальной формах. Такая дискретизация является естественной, и численное расчеты реализуются как прямое компьютерное моделирование динамики несущей жидкости, содержащей частицы, которые могут претерпевать фазовые превращения.

При численной реализации рассматриваемого метода используется комбинирование метода крупных частиц [1] и метода частиц в ячейках [2]. Напомним некоторые основные расчетные формулы этих методов, прежде чем представить дальнейшие детали о численной

реализации соответствующей комбинации этих методов. В методе частиц в ячейках для однородной жидкости (или газа) используются эйлеров и лагранжев подходы одновременно. Этот метод основан на дискретизации законов сохранения массы, моментов и энергии, представленных в следующей интегральной форме

$$\begin{aligned} \int_{V(t)} \rho_t' \, d\tau &= -\int_{S(t)} (\rho W)\cdot N \, ds, \\ \frac{d}{dt}\int_{V(t)} \rho W \, d\tau &= -\int_{S(t)} p\, N \, ds, \\ \frac{d}{dt}\int_{V(t)} \rho E \, d\tau &= -\int_{S(t)} (pW)\cdot N \, ds, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $V(t)$ и $S(t)$ обозначают объем и поверхность некоторой лагранжевой области в жидкости, $N$ является внешней нормалью для такой области, $p = p(\rho, E)$ и $\rho, W, E$ обозначают искомые неизвестные плотность, скорость и полную энергию. Здесь $W = (u, v, w)$ для трехмерной лагранжевой области.

В известном смысле [1], законы сохранения (1) являются эквивалентными законам сохранения массы, моментов и энергии, представленных в следующей дифференциальной форме

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho W) = 0, \\ &\frac{\partial \rho W}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho W \otimes W) + \nabla p = 0, \\ &\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E W) + \operatorname{div}(pW) = 0. \end{aligned} \qquad (2)$$

где $W \otimes W$ обозначает тензорный квадрат вектор-функции $W = W(t, x, y, z)$.

Временная дискретизация в методе частиц в ячейках является естественной. Расчеты проводятся шаг за шагом, начиная с заданной начальной конфигурации рассматриваемой жидкости. Пространственная дискретизация в этом методе является более сложной и принимающей в расчет динамику движения жидкости. Область, занимаемая жидкостью, разбивается на ячейки малого размера и жидкость, заполняющая каждую из таких ячеек, рассматривается как совокупность нескольких частиц. Каждой из этих частиц приписывается масса, объем, энергия и координаты, которые конкретизируются в начальный момент времени. Кроме того, плотность, скорость и полная энергия также определяются для каждой ячейки в начальный момент. Соответствующий временной шаг моделирования движения рассматриваемой жидкости разбивается на три этапа так, чтобы выполнялись дискретные законы сохранения. Например, общая масса частиц сохраняется в процессе вычислений на каждом временном шаге при такой аппроксимации.

На первом этапе каждого временного шага вычисляются скорости частиц, обусловленные действием сил давления, что определяет эйлеров этап рассматриваемой аппроксимации, соответствующей переносу моментов и энергии в каждой ячейке, определяемому силами давления в соответствии с уравнениями моментов и энергии из (1). На втором этапе, принимается в расчет движение рассматриваемых частиц под действием вычисленных моментов, что соответствует лагранжеву этапу аппроксимации уравнения сохранения массы. На этом этапе моделируется перенос массы из некоторой конкретной ячейки в соседние ячейки. На третьем этапе вычисляется окончательный перенос моментов и энергии, что определяет заключительный этап рассматриваемого временного шага. На этом этапе аппроксимируются уравнения моментов и энергии без учета сил давления, что

моделирует перенос моментов и энергии под действием динамических сил инерции из конкретной ячейки в соседние ячейки. Существенной проблемой этого метода является необходимость рассмотрения достаточно большого числа частиц, используемых в расчетах.

Для решения этой проблемы компьютерной обработки большого объема данных можно использовать метод крупных частиц [1]. Временная дискретизация в этом методе является естественной и аналогичной дискретизации в методе частиц в ячейках. Пространственная дискретизация в методе крупных частиц определяется следующим образом. Область, занимаемая жидкостью, разбивается на ячейки малого размера. Жидкость, заполняющая каждую из таких ячеек, рассматривается как «большая» частица. Каждой такой частице приписывается масса, объем и энергия, которые конкретизируются в начальный момент времени. Кроме того, плотность, скорость и полная энергия также определяются для каждой ячейки в начальный момент. Однако объем такой частицы совпадает с объемом ячейки в каждый момент времени. Следовательно, масса и внутренняя энергия каждой частицы определяется теперь через плотность и полную энергию. Таким образом, данные, участвующие в вычислениях, имеют приемлемый объем, поскольку частицы из каждой ячейки, используемые в методе частиц в ячейках, объединяются фактически в одну «большую» частицу, определяемую для каждой ячейки.

Соответствующий временной шаг моделирования движения рассматриваемой жидкости также разбивается на три этапа так, чтобы выполнялись дискретные законы сохранения. Эти этапы метода крупных частиц являются аналогичными этапам метода частиц в ячейках. Модификации необходимы только при моделировании переноса массы, моментов и энергии под действием динамических сил инерции. Например, перенос массы вычисляется как перенос массы рассматриваемой частицы, занимающей конкретную ячейку в соседние ячейки [1]. Такая аппроксимация, используемая в методе крупных частиц, является рациональной, поскольку законы сохранения выполняются на дискретном уровне в процессе всех этапов вычислений. Таким образом, этот метод является экономным относительно объема вычислений и достаточно эффективным при моделировании динамики однородных жидкостей и газов, характеризуемых подходящими уравнениями состояния.

Рассмотрим теперь комбинацию этих методов, разработанную для моделирования динамики несущей жидкости с включениями другой жидкости, которые могут претерпевать фазовые превращения. Временная дискретизация в таком комбинированном методе определяется, как и в рассмотренных методах, а пространственная дискретизация задается следующим образом. Область, занимаемая неоднородной жидкостью, разбивается на ячейки малого размера, например, с равномерными шагами по пространственным переменным. Несущая жидкость, заполняющая каждую из таких ячеек, рассматривается как «большая» частица, а включения рассматриваются как совокупность «малых» частиц, расположенных в каждой такой ячейке. Большим частицам приписывается масса, объем и энергия, определяемые в начальный момент времени. Малым частицам также приписывается масса, объем, энергия и координаты в пространстве, конкретизируемые в начальный момент времени. Кроме того, по этим данным определяется плотность, скорость и полная энергия для каждой ячейки в начальный момент. Таким образом, используется комбинация методов частиц в ячейках и крупных частиц в начальный момент времени.

Временной шаг моделирования движения неоднородной жидкости разбивается на три этапа, которые дополняются этапом предварительного пересчета параметров. На предварительном этапе, внутренняя энергия больших и малых частиц, находящихся в каждой ячейке, распределяется между этими частицами так, чтобы давление в этой ячейке было равным. Соответственно, на этом этапе имеется возможность наблюдать фазовые переходы малых частиц, например, под действием высоких давлений и температур. Такие фазовые переходы реализуются, если давление и температура больше (или меньше) критических давлений и температур на фазовой диаграмме. В случае реализации такого фазового перехода, для малой частицы может измениться объем, энергия и уравнение

состояния. Таким образом, неоднородности рассматриваемой жидкости могут иметь два и более фазовых состояния.

Оставшиеся этапы вычислений данного комбинационного метода являются аналогичными этапам методов частиц в ячейках и крупных частиц. Например, эйлеров этап определяется как в методе крупных частиц [1], а при расчете переноса массы, проводимого на лагранжевом этапе, следует учесть потоки массы, индуцированные большими и малыми частицами в процессе движения. Таким образом, общая масса рассматриваемой неоднородной жидкости сохраняется при вычислениях на каждом временном шаге. Аналогично, в формулах метода крупных частиц учитывается перенос моментов и энергии малых частиц под действием сил инерции из некоторой ячейки в соседние ячейки, что соответствует выполнению законов сохранения (1) на дискретном уровне в процессе всех этапов вычислений.

Представленный комбинированный метод разработан для численного моделирования следующего физического процесса. Предположим, что частицы графита распределены равномерно в некоторой жидкости. Точнее, имеется сплошная среда с частицами графита и предполагается, что такая среда может рассматриваться при высоких давлениях как «жидкость», определяемая подходящим уравнением состояния. Представленный метод использовался для моделирования процесса прохождения сильных ударных волн в такой неоднородной среде. Это давало возможность наблюдать прямые и обратные фазовые переходы частиц графита при проведении компьютерных экспериментов. Результаты таких экспериментов имели хорошее согласование с результатами физических экспериментов. Эти результаты зависели существенно от плотности распределения частиц графита и интенсивности ударных волн, индуцированных, например, граничными условиями.

Этот метод применялся также для моделирования динамики плазмы [3] и является перспективным для проведения численных расчетов параметров процессов диффузии и абсорбции в неоднородных жидкостях и газах.

## Выводы

Представлен новый метод математического моделирования динамики структурно-неоднородных материалов в области больших деформаций и фазовых превращений. Этот метод основан на дискретизации законов сохранения массы, моментов и энергии, представленных в интегральной и дифференциальной формах. Такая дискретизация является естественной, и численное расчеты реализуются как компьютерное моделирование динамики несущей жидкости, содержащей частицы, которые могут претерпевать фазовые превращения. Такой подход кажется более адекватным физической и математической сущности рассматриваемых динамических процессов, поскольку законы сохранения остаются выполненными и на дискретном уровне в рамках принятой точности расчетов.

## Список литературы

1. *Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: «Наука», 1982. – 392 с.

2. *Харлоу Ф. В.* Численный метод частиц в ячейках. // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: «Мир», 1967. – С. 316 – 342.

3. *Boyko S.B., Mischenko V.V., Sandrakov G.V.* The numerical investigation method for evaporated plasma. // Журнал обчислювальної та прикладної математики. – 2007. – № 2 (95). – С. 3 – 12.

УДК 519.61(045)

*Г.М. Терещук, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ПРО ПОБУДОВУ НАБЛИЖЕНИХ РОЗВ'ЯЗКІВ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ ДЛЯ ЗВИЧАЙНИХ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ ДРУГОГО ПОРЯДКУ У ВИГЛЯДІ ТРИГОНОМЕТРИЧНИХ СПЛАЙНІВ

*Розглянуто методику застосування тригонометричних сплайнів для задач побудови наближених розв'язків крайових задач для звичайних диференціальних рівнянь другого порядку зі змінними коефіцієнтами. Невизначені параметри знайдено методом колокацій.*

**Постановка проблеми**

Для кількісного описання фізичного явища інженери та фізики, як правило, використовують математичні моделі цього явища. Такі моделі часто складаються із систем звичайних диференціальних рівнянь чи рівнянь з частинними похідними, на які накладають певні крайові та початкові умови. Для практичного використання знаходять розв'язки цих систем, які задовольняють ці умови. Проте тут виникають певні труднощі, оскільки точному розв'язанню підлягає лише невеликий клас диференціальних рівнянь. Тому виникає необхідність знаходити наближені розв'язки поставлених задач. Методи, що дозволяють знаходити наближені розв'язки, умовно можна поділити дві групи [1].

При застосуванні методів першої групи наближені розв'язки шукають у вигляді аналітичного виразу, в який входять невідомі параметри. Ці методи мають назву аналітичні. До аналітичних методів слід віднести методи, засновані на апроксимації розв'язку, зокрема, методи малого параметра, методи Рітца, методи Гальоркіна тощо.

Методи другої групи дозволяють знаходити наближені значення шуканого розв'язку в певних точках і мають назву чисельні методи. До чисельних методів належать методи Рунге-Кути, ітераційні та різницеві методи тощо [2].

Серед різноманітних аналітичних методів є методи, при яких шуканий розв'язок визначають у вигляді поліноміальних сплайнів [3]. Перевагами поліноміальних сплайнів над іншими класами функцій є:

– можливість узгодження диференціальних властивостей точного та наближеного розв'язків;

– екстремальні властивості сплайнів, які полягають у високій швидкості збіжності сплайнів.

Проте поліноміальні сплайни мають ряд недоліків, одним з яких є те, що вони – составні функції .

Останнім часом було запропоновано клас тригонометричних сплайнів [4], структура яких є більш зручною для використання їх у задачах побудови наближених частинних розв'язків лінійних диференціальних рівнянь.

Розв'язок першої крайової задачі для звичайних диференціальних рівнянь другого порядку зі змінними коефіцієнтами визначаємо у вигляді лінійної комбінації парних тригонометричних фундаментальних сплайнів на рівномірній сітці. Невизначені параметри знаходимо методом колокацій.

Наближений розв'язок порівнюємо із розв'язком, який отримано часто використовуваним скінченнорізницевим методом.

**Мета роботи** – розглянемо лінійне диференціальне рівняння другого порядку зі змінними коефіцієнтами

$$u'' + p(t)u' + q(t)u = f(t) \tag{1}$$

та крайовими умовами

$$\begin{aligned}\alpha_0 u(0)+\beta_0 u'(0)=\alpha,\\ \alpha_0 u(\pi)+\beta_0 u'(\pi)=\beta.\end{aligned} \qquad (2)$$

Зрозуміло, що при $\beta_i=0$, $\alpha_i=1$ маємо першу, $\alpha_i=0$, $\beta_i=1-$ другу, а при $\alpha_i\neq 0$, $\beta_i\neq 0$ – тртю крайові задачі.

Розв'яжемо рівняння (1), використовуючи метод, за яким розв'язок апроксимується тригонометричними сплайнами.

Задамо на проміжку [0,π] сітку $\{x_j\}_{j=0}^{N}$,

де $x_j=jh$, $h=\dfrac{\pi}{N}$, $N\geq 2$ – натуральне;

$h$ – крок сітки.

Значення сіткової функції у вузлах сітки будемо позначати так:

$y_j=y(x_j)$.

Наближений розв'язок рівняння (1), (2) шукаємо у вигляді лінійної комбінації лінійно незалежних функцій $S(k,t)$ $(k=\overline{0,N-1})$, кожна з яких має неперервні похідні до другого порядку включно, тобто

$$u=\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k S(k,t),$$

де $\gamma_k$ – невідомі коефіцієнти;

$$S(k,t)=\frac{2}{N-1}\cdot\left[\frac{1}{2}+\sum_{j=1}^{N-2}\phi(j\cdot t)\cos(j\cdot x_k)+\frac{1}{2}\phi((N-1)t)\cdot\cos((N-1)x_k)\right], \qquad (3)$$

$$\phi(j,t)=\frac{\dfrac{\cos(j\cdot t)}{j^4}+\sum\limits_{m=1}^{100}\left(\dfrac{\cos((2\cdot m\cdot N+j)\cdot t)}{(2\cdot m\cdot N+j)^4}+\dfrac{\cos((2\cdot m\cdot N-j)\cdot t)}{(2\cdot m\cdot N-j)^4}\right)}{\dfrac{1}{j^4}+\sum\limits_{m=1}^{100}\left(\dfrac{1}{(2\cdot m\cdot N+j)^4}+\dfrac{1}{(2\cdot m\cdot N-j)^4}\right)}.$$

Знайдемо $u'$ та $u''$

$$u'=\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k S'(k,t); \qquad (4)$$

$$u''=\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k S''(k,t)\ , \qquad (5)$$

де

$$S'(k,t)=\frac{2}{N-1}\cdot\left[\sum_{j=1}^{N-2}\phi'(j\cdot t)\cos(j\cdot x_k)-\frac{1}{2}\phi'((N-1)t)\cdot\cos((N-1)x_k)\right];$$

$$S''(k,t)=\frac{2}{N-1}\cdot\left[\sum_{j=1}^{N-2}\phi''(j\cdot t)\cos(j\cdot x_k)-\frac{1}{2}\phi''((N-1)t)\cdot\cos((N-1)x_k)\right];$$

а

$$\phi'(j,t)=\frac{\dfrac{-\sin(j\cdot t)}{j^3}-\sum\limits_{m=1}^{100}\left(\dfrac{\sin((2\cdot m\cdot N+j)\cdot t)}{(2\cdot m\cdot N+j)^3}+\dfrac{\sin((2\cdot m\cdot N-j)\cdot t)}{(2\cdot m\cdot N-j)^3}\right)}{\dfrac{1}{j^4}+\sum\limits_{m=1}^{100}\left(\dfrac{1}{(2\cdot m\cdot N+j)^4}+\dfrac{1}{(2\cdot m\cdot N-j)^4}\right)};$$

$$\phi''(j,t)=\frac{\dfrac{-\cos(j\cdot t)}{j^2}-\sum_{m=1}^{100}\left(\dfrac{\cos((2\cdot m\cdot N+j)\cdot t)}{(2\cdot m\cdot N+j)^2}+\dfrac{\cos((2\cdot m\cdot N-j)\cdot t)}{(2\cdot m\cdot N-j)^2}\right)}{\dfrac{1}{j^4}+\sum_{m=1}^{100}\left(\dfrac{1}{(2\cdot m\cdot N+j)^4}+\dfrac{1}{(2\cdot m\cdot N-j)^4}\right)}.$$

Підставимо вирази (3) – (5) у рівняння (1). Отримаємо

$$\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k S''(k,t)+p(t)\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k S'(k,t)+q(t)\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k S(k,t)=f(t);$$

$$\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k\left[S''(k,t)+p(t)S'(k,t)+q(t)S(k,t)\right]=f(t).$$

Позначимо $a(k,t)=S''(k,t)+p(t)S'(k,t)+q(t)S(k,t)$. Отримаємо рівняння

$$\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k a(k,t)=f(t).$$

Мінімізуємо нев'язку $\varepsilon(t)=\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k a(k,t)-f(t)$ методом колокацій, тобто нев'язку

$$\varepsilon(t)=\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k a(k,t)-f(t)$$

у вузлах сітки прирівняємо до нуля. Отримаємо систему рівнянь

$$\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k a(k,x_j)-f(x_j)=0,\ j=\overline{0,N-1}$$

або

$$\sum_{k=0}^{N-1}\gamma_k a(k,x_j)=f(x_j),\ j=\overline{0,N-1}. \tag{6}$$

*Перша кройова задача ($\beta_i=0$, $\alpha_i=1$).*

Задовольнимо крайову умову (2)

$$u(0)=\sum_{k=0}^{N+1}\gamma_k S(k,0)=\alpha; \tag{7}$$

$$u(\pi)=\sum_{k=0}^{N+1}\gamma_k S(k,\pi)=\beta. \tag{8}$$

Оскільки $S(k,0)=2$, якщо $k=0$ та $S(k,0)=0$, якщо $k\neq 0$, то рівняння (7) набуде вигляду

$$2\cdot\gamma_0+0\cdot\gamma_1+...+0\cdot\gamma_{N+1}=\alpha,$$

звідки

$$\gamma_0=\frac{\alpha}{2}. \tag{9}$$

Оскільки $S(k,\pi)=2$, якщо $k=N-1$ та $S(k,\pi)=0$, якщо $k\neq N-1$,то рівняння (8) набуде вигляду

$$0\cdot\gamma_0+0\cdot\gamma_1+...++0\cdot\gamma_{N-2}+2\cdot\gamma_{N-1}+0\cdot\gamma_N+0\cdot\gamma_{N+1}=\beta,$$

звідки знаходимо

$$\gamma_{N-1}=\frac{\beta}{2}. \tag{10}$$

Розв'язавши систему рівнянь, що складається з системи (6) та рівнянь (9), (10), знайдемо невідомі коефіцієнти $\gamma_k$. Підставимо їх у вираз (6) та отримаємо розв'язок крайової задачі (1), (2).

*Друга кройова задача ($\alpha_i=0$, $\beta_i=1$).*

Задовольнимо крайову умову (2)

$$u'(0) = \sum_{k=0}^{N+1} \gamma_k S'(k,0) = \alpha;$$

$$u'(\pi) = \sum_{k=0}^{N+1} \gamma_k S'(k,\pi) = \beta.$$

Оскільки

$$S'(k,0) = S'(k,\pi) = 0 \ ,$$

То друга крайова задача має сенс лише при умові, що $\alpha = \beta = 0$.

В такому випадку для розв'язання задачі (1)-(2) необхідно розв'язати систему рівнянь (6) відносно невідомих коефіцієнтів $\gamma_к$ та підставити їх у вираз (6).

*Третя кройова задача ($\alpha_i \neq 0$, $\beta_i \neq 0$).*

Задовольнимо крайову умову (2)

$$\alpha_0 u(0) + \beta_0 u'(0) = \sum_{k=0}^{N+1} \gamma_k \left(\alpha_0 S(k,0) + \beta_0 S'(k,0)\right) = \alpha; \qquad (11)$$

$$\alpha_0 u(\pi) + \beta_0 u'(\pi) = \sum_{k=0}^{N+1} \gamma_k \left(\alpha_0 S(k,\pi) + \beta_0 S'(k,\pi)\right) = \beta. \qquad (12)$$

Оскільки $S'(k,0) = 0$, $S(k,0) = 2$, якщо $k = 0$ та $S(k,0) = 0$, якщо $k \neq 0$, то рівняння (11) перепишеться у вигляді

$$\alpha_0 \left(2 \cdot \gamma_0 + 0 \cdot \gamma_1 + ... + 0 \cdot \gamma_{N+1}\right) = \alpha \ ,$$

звідки

$$\gamma_0 = \frac{\alpha}{2\alpha_0}. \qquad (13)$$

Аналогічним чином з рівняння (12) отримаємо

$$\gamma_{N-1} = \frac{\beta}{2\alpha_0}. \qquad (14)$$

Для розв'язання третьої крайової задачі розв'яжемо систему рівнянь, що складається з системи рівнянь (6) та рівнянь (13), (14). Знайдемо невідомі коефіцієнти $\gamma_к$ та підставимо їх у вираз (6). Отримаємо розв'язок третьої крайової задачі (1), (2).

## Висновки

Розглянуто методику застосування тригонометричних сплайнів для задач побудови наближених розв'язків крайових задач для звичайних диференціальних рівнянь другого порядку зі змінними коефіцієнтами. Проте збіжність наближених частинних розв'язків диференціальних рівнянь другого порядку зі змінними коефіцієнтами, побудованих за допомогою апроксимації розв'язку тригонометричними сплайнами, потребує подальшого дослідження.

## Список літератури


1. *Березин И.С.* Методы вычислений: в 2.т. / *И.С.Березин, Н.П. Жидков*. – М.: Физматгиз,1959 – Т.2. – 1959. – 620с.

2. *Денисюк В.П.* Сплайни та сигнали / В.П. *Денисюк* –К.: ЗАТ «ВІПОЛ», 2007.–228с.

3. *Завьялов Ю.С.* Методы сплайн-функций./ *Ю.С.Завьялов Б.И. Квасов, В.Л. Мирошниченко* – М.: Наука, 1980. – 352с.

4. *Зенкевич О.* Конечне элементы и аппроксимация: Пер. с англ./ *О. Зенкевич ,К. Морган* –М.: Мир, 1986. 318 с., ил.

УДК: 378.937+378.14+351.78

*О.Б. Пасічник, аспірант*
*(Національний університет «Львівська політехніка», Україна)*

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ВПЛИВУ СЕРЕДНЬОРІЧНОЇ КІЛЬКОСТІ ОПАДІВ НА АРЕАЛИ ЛІСІВ УКРАЇНИ

*Піднімається проблема зміни клімату та його впливу на ареали лісів. Сформовано математичну модель, яка описує вплив кліматичних параметрів на ареали лісів. На основі реальних даних проаналізовано вплив середньорічної кількості опадів на ареали лісів України.*

Клімат – це багаторічний режим погоди на певній місцевості, зумовлений географічними умовами. Він має величезне значення, оскільки під впливом основних факторів кліматоутворення – тепла, вологи, тривалості світлового дня – формується відповідна рослинність.

На сьогодні проблема зміни клімату є першочерговою для людства. За останні кілька десятків років клімат планети суттєво потеплішав. Середня температура зросла щонайменше на 0.3 – 0.6 градуса і цей процес постійно продовжується. Підписання Рамкової Конвенції ООН про Зміну Клімату представниками 150 країн свідчить про те, що зміна клімату загрожує екології Землі, а відповідповідно і має великий вплив на ареали проростання різних лісових порід [1]. Тому актуальною науковою задачею є дослідження і аналіз кліматичних параметрів (температури, вологості, кількості опадів та ін.) та їх значень для кожного виду лісу. Кожному виду лісу притаманні певні кліматичні параметри та діапазони їх зміни. В цьому дослідженні проаналізовано вплив одного з кліматичних параметрів – середньорічної кількості опадів – для території України.

Клімат України вцілому помірно-континентальний. На Південному березі Криму – субтропічний середземноморський. Загальною закономірністю клімату України є зростання його континентальності з заходу на схід і близька до широтної зональність у розподілі температури, вологості та опадів.

На території України опади розподіляються нерівномірно. Кількість їх змінюється залежно від пори року, рельєфу, географічного положення місцевості та інших факторів. Найбільше опадів випадає у гірських районах Карпат (в окремих районах понад 1500 мм), найменше – на узбережжях Чорного та Азовського морів (близько 300-400 мм) [2]. Пересічна кількість опадів у Поліссі становить 550-700, у Лісостепу – 600-450 мм/рік. У Поліссі та Лісостепу спостерігається поступове зменшення кількості опадів у напрямі з заходу на схід. У степовій зоні в північних районах випадає 450-475. У степовій частині Криму кількість опадів зростає у напрямі на південь до Кримських гір (до 470-500 мм/рік). На Південному березі Криму випадає 550-700 мм/рік. У теплу пору року опадів випадає у 2-3 рази більше, ніж в холодну. Винятком є Південний берег Криму, де найбільша кількість опадів припадає на холодну пору року [2]. Кількість днів з опадами в Карпатах та Кримських горах досягає 180, у Поліссі та на півночі Лісостепу – 190, на морських узбережжях – 100. Загалом для України характерні значні коливання кількості опадів у різних районах у різний час.

Кількість опадів має суттєвий вплив на зміну території поширення лісу, оскільки потеплішання атмосфери веде до зміни кількості опадів на усій території, а також до появи дещо інших умов проростання лісів. Отже насамперед необхідно дослідити, які значення розглянутого кліматичного параметра (кількості опадів) притаманні для лісових порід.

Для аналізованих процесів, а також для просторового і табличного представлення даних, використано засоби сучасної геоінформаційної системи та мови програмування C#. Як вхідні дані використано цифрову карту ізоліній середньорічної кількості опадів на території України, сформовану засобами ГІС MapInfo [3] (рис. 1).

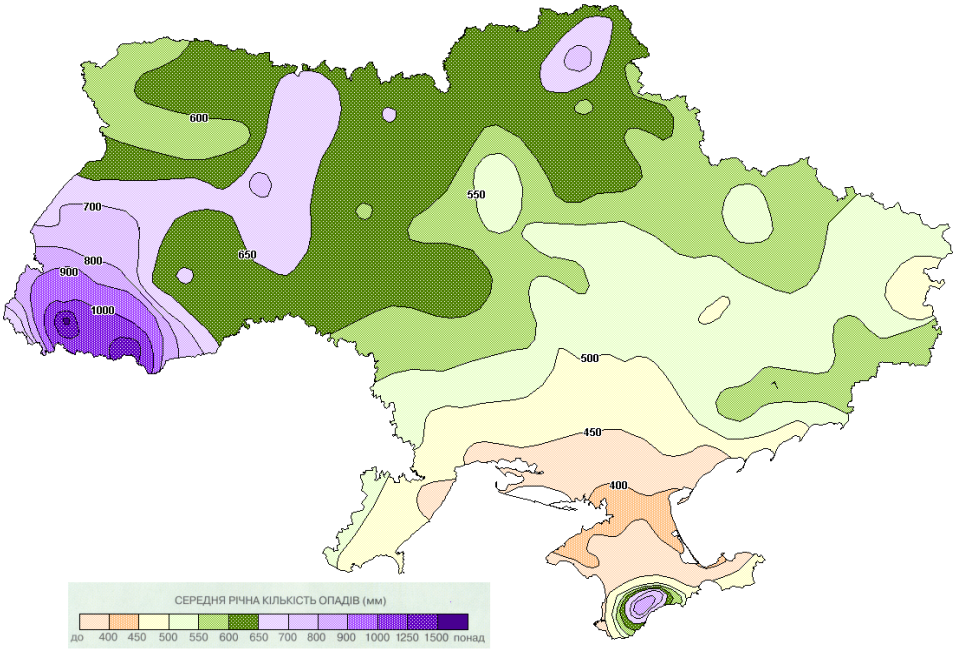



Рис. 1. Середня річна кількість опадів (мм) на території України

На території України проростають хвойні та широколисті (сосна, бук, дуб, береза, граб, вільха, клен, липа), Карпатські гірські та передгірні (ялина, ялиця, бук, дуб), Кримські гірські (сосна, дуб, граб, ялівець, бук чагарники) ліси [4,5]. Карта на рис.2 відображає потенційні зони розташування лісів на території України.

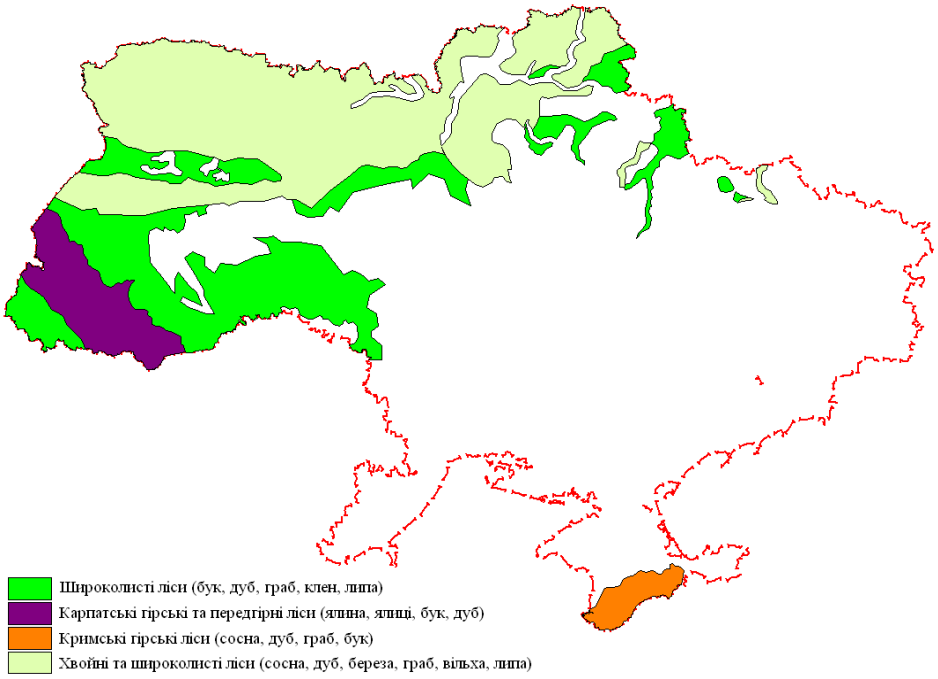



Рис. 2. Карта потенційних лісів України

Для здійснення просторового аналізу середньорічної кількості опадів для ареалів лісів необхідно сформувати елементарні об’єкти, в межах яких буде відбуватися такий аналіз. За основу поділу на такі об’єкти було вибрано елементарні ділянки розміром $5\times5$ км, обмежені кордонами України. Для подальшого аналізу, використовуючи засоби геоінформаційної системи, виконуємо наступне:

1) розділяємо карту потенційних лісів елементарними ділянками ($5\times5$ км);
2) накладаємо на карту потенційних лісів карту середньорічної кількості опадів;
3) елементарним ділянкам, через які проходять ізолінії кліматичного параметра, присвоюємо відповідне значення кількості опадів.

Результати присвоєння заносимо у таблицю: записуємо 0, якщо через елементарну ділянку не проходить жодна ізолінія, або фіксоване значення кліматичного параметра, якщо ізолінія проходить. Використовуючи наявні значення кліматичного параметра здійснюється інтерполяція в межах географічної широти і висоти. Таким чином чином фіксуються значення параметру для решти елементраних об‘єктів.

В загальному випадку приймаємо, що ареали лісів залежать від Z фізико-географічних та кліматичних параметрів $p_1, p_2, ..., p_Z$ (висота над рівнем моря, тип грунту, середня температура, кількість опадів, тощо). Нехай кожен з цих параметрів змінюється в певному діапазоні від мінімального до максимального значень, тобто $p_z \in [p_{z,\min}, p_{z,\max}]$, $z = \overline{1,Z}$. Розбиваємо кожен діапазон зміни z-го параметра на $K_z$ однакових піддіапазонів $p_z^{(k)}$, $k = \overline{1,K_z}$ з межами:

$$p_z^{(k)} \in [p_{z,\min}^{(k)}, p_{z,\max}^{(k)}[. \quad (1)$$

Розглядаємо об‘єкт лісу в кожній елементарній ділянці. Для цієї ділянки лісу притаманні певні значення фізико-географічних та кліматичних параметрів $p_z = \overline{1,Z}$, які попадають у відповідні піддіапазони, означені співвідношенням (1). Введемо узагальнений параметр $q_{k_1,k_2,...,k_Z}$, який описує підмножину елементарних ділянок лісу з однаковими фізико-географічними і кліматичними параметрами. Під таким узагальненим параметром зручно використовувати сумарну площу таких ділянок

$$q_{k_1,k_2,...,k_Z} = \sum_{n=1}^{N} \sum_{l=1}^{L_n} s_{n,l} \Big|_{(p_1 \in p_1^{(k_1)}) \wedge ... \wedge (p_Z \in p_Z^{(k_Z)})} \quad (2)$$

Множина узагальнених параметрів (2) для всіх діапазонів

$$Q = \{q_{k_1,k_2,...,k_Z},\ k_1 = \overline{1,K_1}, ..., k_Z = \overline{1,K_Z}\}, \quad (3)$$

описує в Z-вимірному просторі параметрів $p_1, p_2, ..., p_Z$ певне “тіло”.

У розглянутому випадку (використовуємо тільки один кліматичний параметр – середньорічна кількість опадів) ареали лісів залежать від параметра $p_1$. Для аналізованої території цей параметр змінюється в певному діапазоні від мінімального до максимального значень, тобто $p_1 \in [p_{\min}, p_{z,\max}]$.

Діапазон зміни середньорічної кількості опадів зручно розбити на піддіапазони з кроком 50 мм/рік. Підсумувавши загальну площу лісів у кожному піддіапазоні зміни кліматичного параметра, отримуємо значення наведені в табл.1 і табл.2, а також показані графічно на рис.3:

Таблиця 1 – Площа Кримських гірських лісів у піддіапазонах зміни кліматичного параметра

| Кількість опадів (мм/р): | 0/400 | 400/450 | 450/500 | 500/550 | 550/600 | 600/650 | 650/700 | 700/750 | 750/800 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Площа лісу (км2): | 0.10 | 1095.36 | 1064.16 | 1119.98 | 815.32 | 558.15 | 970.72 | 53.39 | 695.30 |

Таблиця 2 – Площа широколистих лісів у піддіапазонах зміни кліматичного параметра

| Кількість опадів (мм/р): | 500/550 | 550/600 | 600/650 | 650/700 | 700/750 | 750/800 | 800/850 | 850/900 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Площа лісу (км2): | 896.89 | 11462.22 | 38588.08 | 12395.20 | 2192.28 | 3141.35 | 1091.76 | 1945.08 |
| Кількість опадів (мм/р): | 900/950 | 950/1000 | 1000/1050 | 1050/1100 | 1100/1150 | 1150/1200 | 1200/1250 | |
| Площа лісу (км2): | 796.48 | 548.02 | 174.62 | 412.33 | 130.00 | 152.05 | 522.89 | |

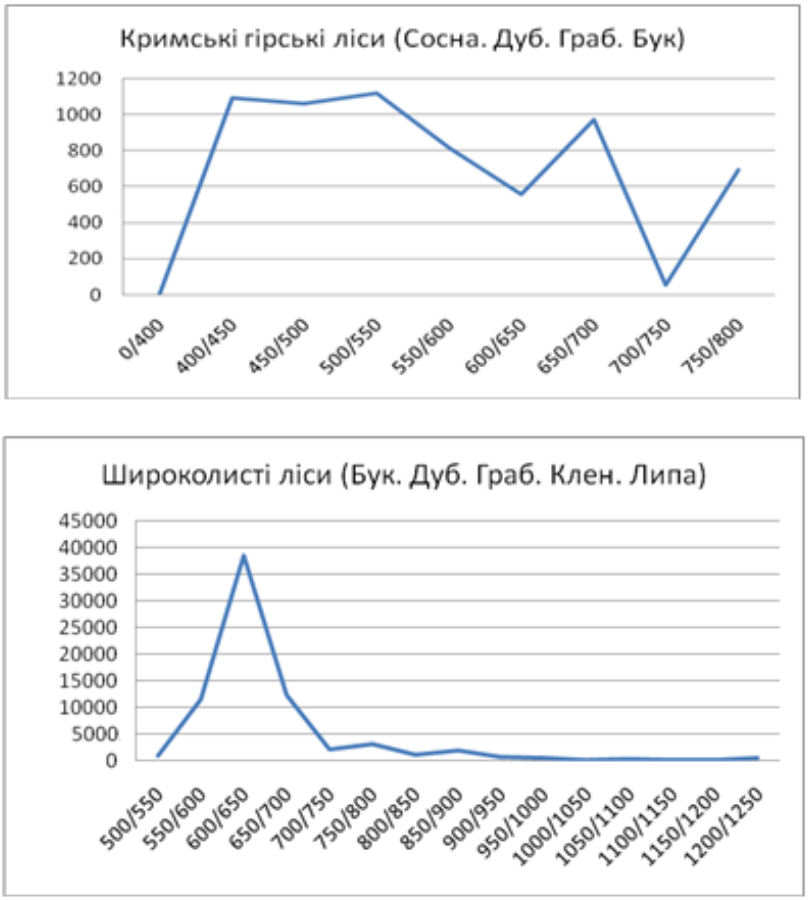



Рис. 3. Графіки залежності площі лісу (км$^2$) від середньої кількості опадів (мм/рік)

Аналізуючи вище наведені результати дослідження, очевидним є те, що найбільш притаманними для широколистих лісів є середньорічні опади в межах 600 – 700 мм/рік; для Кримських гірських лісів – 400 – 600 мм/рік.

## Висновки

Запропонована математична модель і створений інструментарій демонструть, на прикладі середньорічної кількості опадів, можливість реалізації геоінформаційної технології, яка дасть можливість прогнозувати вплив зміни клімату на території поширення рослинності.

## Список літератури

1. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України/ *Р.А.Бунь, М.І.Густі, В.С.Дачук та ін*.; За ред. Р.А.Буня.- Львів: УАД, 2004.- 376с.

2. *Галущенко О.М.* Розподіл полів кількості атмосферних опадів на річкових водозборах басейну Дніпра // Вісник Київського університету. Географія. - 1995. - Вип.41. – С.109-119.

3. Просторова база даних України масштабу 1:500 000. Версія 1.5. Опис інформаційного забезпечення. 24088287.БДУ.П5.- Київ: ТзОВ "Інтелектуальні Системи ГЕО" (ТзОВ ІСГЕО), 1999.

4. *Генсірук С.А., Нижник М.С., Копій Л.І.* Ліси Західного регіону України.- Львів: Світ, 1995.- 424 с.

5. Короткий довідник по лісовому фонду України (за матеріалами чергового державного обліку лісів України станом на 01.01.96).- Київ: Державний комітет лісового господарства України, 1998.- 101 с.

УДК 004.942:519.876.5

*О.Б. Яремчишин, Р.А. Бунь*
*(НУ„ЛП”, Україна)*

# МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ПРОСТОРОВОГО АНАЛІЗУ ЕМІСІЇ ПАРНИКОВИХ ГАЗІВ ВІД ВИРОБНИЦТВА М’ЯСА НА РЕГІОНАЛЬНОМУ РІВНІ

*Представлено математичні моделі для просторової інвентаризації парникових газів в категорії „М’ясо” сектору „Промисловість”, які дають можливість здійснювати оцінку викидів на регіональному рівні. На основі статистичних даних отримано просторові кадастри емісії парникових газів від виробництва м’яса в областях Західної України на рівні елементарних ділянок розміром 5×5 км.*

Глобальне потепління клімату, яке проявляється в змінах кліматичних умов, спонукає до посиленого дослідження антропогенної складової парникового ефекту, оскільки концентрація в атмосфері парникових газів в найбільш значній мірі зростає внаслідок промислової, сільськогосподарської та інших видів діяльності людини [1].

На міжнародному рівні запропоновано здійснювати так звані національні інвентаризації антропогенних викидів парникових газів для основних секторів економіки [2, 3]. Попри свою універсальність така оцінка емісій дає надто узагальнені результати. Тому виникає необхідність у просторовій інвентаризації викидів, яка б давала можливість отримувати дані про реальний територіальний розподіл парникових газів [4]. Такий метод передбачає аналіз емісій на рівні координатної сітки визначеного розміру і є узгодженим з визнаними на міжнародному рівні методиками [5].

В промисловому секторі знаходяться одні з найбільш потужних джерел емісій парникових газів. Джерелами викидів в цьому секторі є промислові процеси, що не пов’язані зі спалюванням палива. Емісії парникових газів тут зумовлені процесами хімічної та фізичної трансформації матеріалів [2].

Промисловий сектор відповідно до міжнародних методик інвентаризації [2] розділено на шість підсекторів: виробництво мінеральних речовин, виробництво хімічних речовин, виробництво металів, целюлозно-паперова та харчова промисловості, виробництво та використання фторвуглецiв і гексафториду сірки. В підсекторі „Харчова промисловість” оцінюються емісії від таких промислових процесів, як виробництво продуктів харчування (цукру, м’яса тощо) та напоїв.

Для оцінки величини викидів парникових газів від промислової діяльності на рівні елементарних ділянок процесам емісії поставлено у відповідність математичну модель [4]:

$$E^G(\delta) = \sum_{a=1}^{A} \left[ F_a(\delta) \cdot EF_a^G(\delta) \right], \qquad (1)$$

де $E^G(\delta)$ – емісії G -го парникового газу від промислової діяльності в елементарній ділянці $\delta$; $F_a(\delta)$ – дані щодо a -го роду промислової діяльності в елементарній ділянці $\delta$ (обсяги виробництва промислової продукції); $EF_a^G(\delta)$ – коефіцієнт емісії $G$ -го парникового газу від $a$ -го роду промислової діяльності в елементарній ділянці $\delta$; A – кількість родів промислової діяльності.

Перевагою такої моделі інвентаризації є те, що в цілому результати інвентаризації не є зосередженими, вони відносяться до відповідних елементарних ділянок. Результати, представлені в такому вигляді, відображають регіональну специфіку процесів емісії парникових газів [5].

Для здійснення просторової інвентаризації парникових газів на регіональному рівні необхідно насамперед сформувати елементарні об’єкти, в межах яких здійснюватиметься інвентаризація парникових газів. Під такими об’єктами слід розуміти ділянки розміром $l \times l$ км, які також обмежені границями адміністративних районів. Тобто, в межах кожного

району створюється множина елементарних об'єктів розміром $l \times l$ км. Частина з цих об'єктів є "повноцінними", оскільки вони мають правильну форму і їх площа дорівнює $l^2$ км$^2$. Решта об'єктів мають неправильну форму, оскільки їх обмежує границя відповідного району [6].

При моделюванні і просторовому аналізі емісії парникових газів необхідно мати дані про обсяги виробництва (для окремих підкатегорій джерел – обсяги використання) промислової продукції, віднесені до окремої елементарної ділянки. Дані про обсяги виробництва м'яса взято із статистичних збірників [7-13] та розподілено по елементарних об'єктах за певними алгоритмами. Для формування георозподілених вхідних даних при аналізі емісій парникових газів від виробництва м'яса пропонується підхід, у відповідності з яким обсяги виробництва м'яса розділено між елементарними об'єктами пропорційно до населення міст обласного підпорядкування, міст і селищ міського типу.

Міське населення в будь-якій окремій елементарній ділянці є сумою кількості населення по всіх містах і селищах міського типу, що розміщенні повністю в її межах, та частки населення, пропорційної до частки площі міста (чи селища міського типу), яка потрапила в дану ділянку (коли певний населений пункт частково знаходиться в її межах):

$$Q(\delta) = \sum_{s \in \left\{ s \in \widetilde{S}^{Urb,R} \wedge s \cap \delta \neq \phi \right\}} \frac{Q(s) \cdot area(s \cap \delta)}{area(s)}, \qquad (2)$$

$$R = \left\{ R \in \widetilde{R} \wedge \delta \mathrel{\widehat{\in}} R \right\}, \quad \widetilde{S}^{Urb,R} = \widetilde{S}^{Urb} \mathrel{\widehat{\cap}} R,$$

де $Q(x)$ – кількість населення, що проживає в об'єкті x; $\widetilde{S}^{Urb,R} = \left\{ S_1^{Urb,R}, S_2^{Urb,R}, ... \right\}$ – множина міст та селищ міського типу, що належать району R; $area(x)$ – площа об'єкту x. В формулі (2) використано наступні співвідношення: $x \mathrel{\widehat{\in}} y$ – географічний об'єкт x територіально цілком розміщений в межах об'єкту $y$; $x \mathrel{\widehat{\cap}} y = z$ – об'єкт z є спільною територією об'єктів $x$ і $y$, причому $z \neq \phi$, якщо об'єкти x і y мають хоча б одну спільну точку на межі.

Таким чином, математична модель інвентаризації парникових газів для здійснення просторового аналізу емісій від виробництва м'яса на рівні елементарних ділянок має наступний вигляд:

$$E^G(\delta) = \sum_{a=1}^{A} \left[ \frac{F_a(R) \cdot EF_a^G(\delta)}{\sum_{s \in \widetilde{S}^{Urb,R}} Q(s)} \cdot \sum_{s \in \left\{ s \in \widetilde{S}^{Urb,R} \wedge s \cap \delta \neq \phi \right\}} \frac{Q(s) \cdot area(s \cap \delta)}{area(s)} \right], \qquad (3)$$

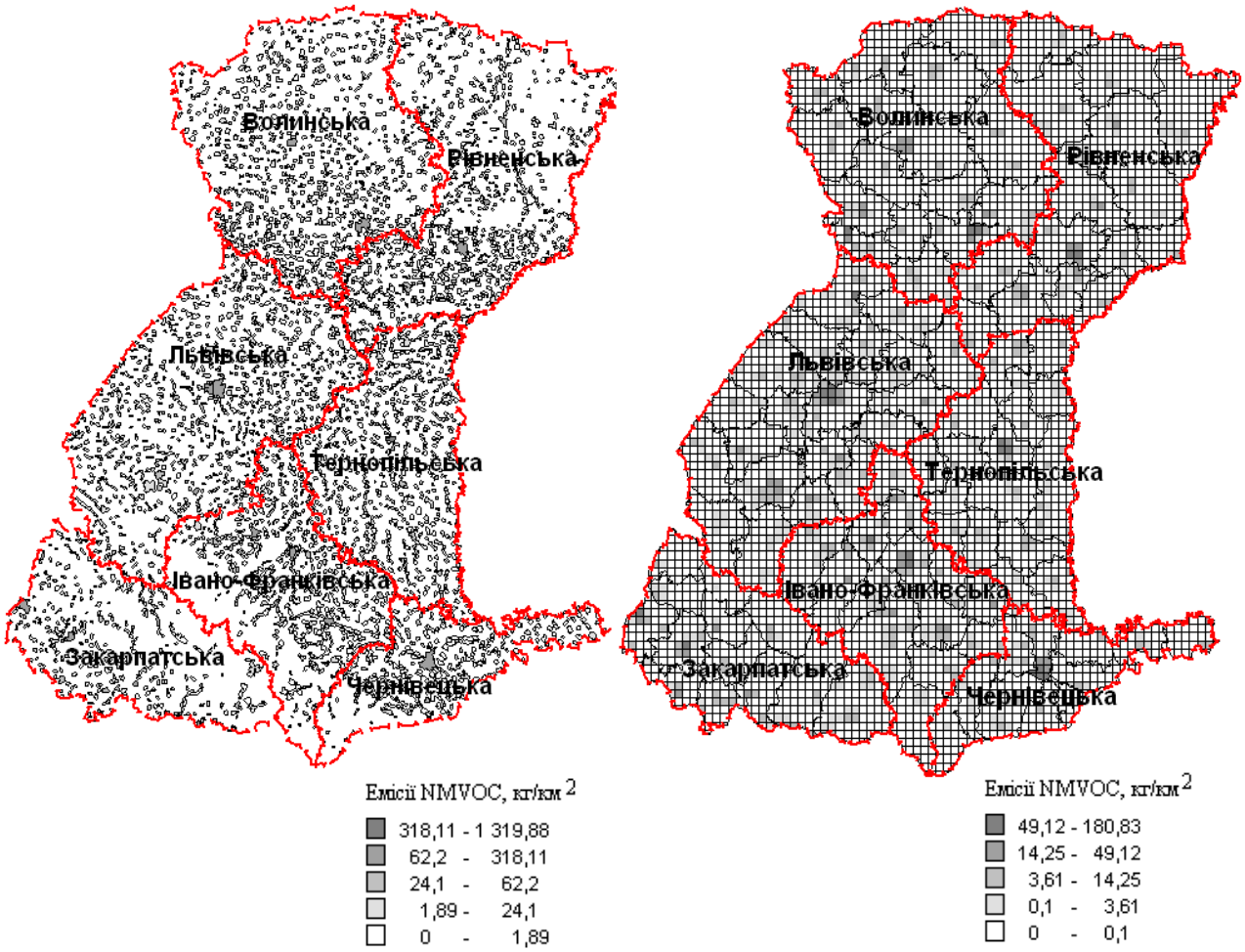
$$R = \left\{ R \in \widetilde{R} \wedge \delta \mathrel{\widehat{\in}} R \right\}, \quad \widetilde{S}^{Urb,R} = \widetilde{S}^{Urb} \mathrel{\widehat{\cap}} R,$$

де $E^G(\delta)$ – емісії G-го парникового газу від промислових джерел в елементарній ділянці $\delta$; $F_a(R)$ – дані щодо a-го роду промислової діяльності в адміністративному районі $R$ (районні обсяги виробництва м'яса); $EF_a^G(\delta)$ – коефіцієнт емісії $G$-го парникового газу від a-го роду промислової діяльності в елементарній ділянці $\delta$; $Q(x)$ – кількість населення, що проживає в об'єкті x; $\widetilde{S}^{Urb,R} = \left\{ S_1^{Urb,R}, S_2^{Urb,R}, ... \right\}$ – множина міст та селищ міського типу, що належать району R; area(x) – площа об'єкту x; A – кількість родів промислової діяльності.

Цю математичну модель просторової інвентаризації парникових газів програмно реалізовано у вигляді спеціалізованої геоінформаційної системи, яка базується на використанні узгоджених на міжнародному рівні методик [2, 3]. На основі розподілених за цією моделлю значень обсягів виробництва завдяки створеній геоінформаційній системі досліджено емісії парникових газів від одного з основних джерел підсектору „Харчова промисловість" на території Західної України. Результатом виконання комп'ютерної програми є цифрові карти та відповідні георозподілені бази даних, що містять інформацію про джерела емісії в розрізі окремих елементарних ділянок, кількісні оцінки емісії та їх структура для окремих джерел викидів парникових газів.

Виробництво продуктів харчування супроводжується емісіями летких неметанових вуглецiв (NMVOC). В даній роботі використано коефіцієнти емісій NMVOC, запропоновані

Міжурядовою групою експертів із зміни клімату [2]. Обсяги виробництва взято із відповідних статистичних збірників [7-13]. Для територіального розподілу обсягів виробництва використано цифрову карту населених пунктів та розподілу щільності населення 1:500 000 [14]. В результаті просторової інвентаризації отримано множину числових значень емісій летких неметанових вуглеців від виробництва м'яса на рівні елементарних ділянок розміром 5×5 км (рис. 1).




а) б)

Рис.1. Питомі емісії летких неметанових вуглеців (NMVOC) від виробництва м'яса в Західній Україні (2006 р.) на рівні: а) населених пунктів; б) елементарних ділянок

На рис.1 видно елементарні ділянки, які є лідерами щодо емісій парникових газів від виробництва м'яса. Отже, заходи щодо зменшення емісій від даної підкатегорії джерел необхідно проводити переважно на цих територіях. Загалом, найбільші викиди дають Львівська та Волинська області. Результати показують надзвичайно нерівномірну концентрацію промислового виробництва в різних регіонах України, що засвідчує доцільність проведення просторової інвентаризації.

Такий геоінформаційний підхід дає можливість будувати георозподілені кадастри емісій парникових газів від виробництва промислової продукції. Він дозволяє досліджувати структуру викидів парникових газів по всіх категоріях промислових джерел на різних територіальних рівнях: на рівні елементарних об'єктів, певних ділянок території, адміністративних районів чи на рівні області загалом. Сумування емісій від різних підкатегорій джерел по елементарних ділянках дозволяє отримати результати традиційної (національної) інвентаризації на рівні країни.

## Висновки

З використанням розробленого математичного та програмного інструментарію виконано просторовий аналіз емісій парникових газів від промислових процесів виробництва м'яса. Отримано територіальний розподіл викидів летких неметанових вуглецiв (NMVOC) від цієї категорії джерел в Західній Україні в 2006 році. Побудовано георозподілені кадастри викидів NMVOC на рівні елементарних ділянок розміром 5×5 км. Зафіксовано ділянки-лідери з емісій від досліджуваного промислового джерела.

Застосування геоінформаційного підходу дає структуру викидів по категоріях джерел і показує вклад в загальні емісії кожної окремо взятої елементарної ділянки, наочно ілюструє найбільш забруднені території. Це робить просторову інвентаризацію парникових газів необхідною в плані міжнародних угод щодо скорочення чи обмеження емісій (зокрема в питанні торгівлі квотами) і сприятиме успішній реалізації заходів, спрямованих на покращення стану навколишнього середовища.

## Список літератури


1. *Бунь Р.А., Густі М.І., Дачук В.С.* та ін. Інформаційні технології інвентаризації парникових газів та прогнозування вуглецевого балансу України. – Львів: УАД, 2004. – 376 с.
2. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reporting instructions. – Vol. 1. – IPCC, 1996.
3. The IPCC software for estimating greenhouse gas emissions. IPCC Version 1.1, 1998. – http://www.ipcc-nggip.iges.or.jo/public/gl/software.htm.
4. *Яремчишин О.Б.* Моделювання та просторовий аналіз емісій парникових газів в промисловому секторі Львівської області // Матеріали 7-ї відкритої наукової конференції професорсько-викладацького складу ІМФН. – Львів: НУ „ЛП", 2008. – С. 65.
5. *Bun R., Gusti M., Bun A., Hamal Kh.* Multilevel model for greenhouse gas inventory and uncertainty analysis concerning the Kyoto protocol implementation / Intern. Conf. on Ecological Modelling "ICEM 2006". – Yamaguchi, Japan, 2006. – P. 141.
6. *Бунь Р.А., Гамаль Х.В.* Геоінформаційна технологія просторової інвентаризації парникових газів в енергетичній галузі на регіональному рівні // Вісник СНУ ім. Даля. – 2008. – № 1 (119). – С. 17-25.
7. Діяльність підприємств – суб'єктів підприємницької діяльності Чернівецької області у 2006 році: Статистичний збірник. – Чернівці: Головне управління статистики у Чернівецькій області, 2007. – 188 с.
8. Промисловість Волині у 2001-2006 роках: Статистичний збірник. – Луцьк: Головне управління статистики у Волинській області, 2007. – 80 с.
9. Промисловість Івано-Франківщини за 2006 рік: Статистичний збірник. – Івано-Франківськ: Головне управління статистики в Івано-Франківській області, 2007. – 127 с.
10. Промисловість Львівщини: Статистичний збірник. – Львів: Головне управління статистики у Львівській області, 2007. – 196 с.
11. Промисловість Рівненщини 2001-2006: Статистичний збірник. – Рівне: Головне управління статистики у Рівненській області, 2007. – 181 с.
12. Промисловість Тернопільщини у 2003-2007 роках: Статистичний збірник. – Тернопіль: Головне управління статистики у Тернопільській області, 2008. – 85 с.
13. Статистичний щорічник Львівської області за 2006 рік: Частина 1. – Львів: Головне управління статистики у Львівській області, 2007. – 368 с.
14. Просторова база даних України масштабу 1:500 000. Версія 1.5 / Товариство з обмеженою відповідальністю „Інтелектуальні Системи ГЕО" (ТзОВ ІСГЕО).

УДК: 532.526.4

*Є.О. Шквар, кандидат технічних наук*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ ТУРБУЛЕНТНИМИ ПРИМЕЖОВИМИ ШАРАМИ ШЛЯХОМ РУЙНУВАННЯ ВЕЛИКОМАСШТАБНОЇ ТУРБУЛЕНТНОСТІ

*Запропоновано математичну модель та метод розрахунку турбулентного примежового шару зі встановленими поблизу обтічної поверхні пристроями руйнування великих вихорів. Співставленням розрахункових результатів з даними відповідних експериментів продемонстровано спроможність розрахунковим чином на основі розробленого підходу відтворити характерні особливості деформації розподілів ряду локальних характеристик течії, а також зменшення коефіцієнту опору тертя як результат дії даного засобу управління турбулентним рухом.*

Загострення нестабільності на ринку енергоносіїв, збільшення актуальності дотримання екологічних вимог і невпинно зростаюча конкуренція серед розробників та виробників транспортних засобів є факторами, які обумовлюють необхідність пошуку та впровадження нових заходів, спрямованих на підвищення економічної ефективності сучасної транспортної техніки. Одним із ефективних шляхів зниження собівартості перевезень є застосування методів та технологій зменшення опору тертя транспортних засобів, який складає у залежності від їх швидкості і призначення від 30 до 90 % лобового опору. Так, згідно даних, узагальнених Шміттом [1] та Філіппоне [2], опір тертя сучасних транспортних літаків складає від лобового опору 40–80 %, для підводного човна – 70 %, для надводних суден – 30–90 %, для трубопровідного транспорту – 90 %. Впровадження методів зменшення тертя, окрім зменшення витрат пального, має також і інші, не менш важливі позитивні ефекти, які полягають в зменшенні забруднень навколишнього простору та в збільшенні швидкості руху, і є одними з найсуттєвіших ознак конкурентоспроможності транспортної техніки. Враховуючи розміри та швидкості сучасних зразків авіаційного та водного транспорту, можна зробити однозначний висновок про те, що на переважній частині зовнішньої поверхні формується турбулентний режим обтікання. Турбулентне обтікання характеризується надто складним механізмом взаємодії як між вихровими структурами, що виникають в течії внаслідок турбулентності, так і між потоком та обтічною поверхнею і, як результат, суттєво більшим у порівнянні з ламінарною течією опором тертя. Це, в свою чергу, обумовлює першочерговий інтерес до розробки методів впливу саме на турбулентний рух з метою зменшення турбулентного тертя, формування умов, що сприяють безвідривному обтіканню, а також керування процесами конвективного теплообміну. Дослідження в цьому напрямку потребують проведення поглиблених експериментів з метою з’ясування складної структури формування течій в безпосередній близькості від обтічної поверхні і процесів взаємодії на окремі компоненти цієї структури, особливо при турбулентному режимі обтікання, а також узагальнення отриманої інформації в формі математичних моделей. Накопичені до цього часу результати свідчать про те, що існує ряд працездатних методів впливу на турбулентну течію з метою впорядкування її структури таким чином, що опір тертя зменшується, але загальним недоліком усіх відомих підходів є досить вузький діапазон режимних параметрів, при яких вони забезпечують позитивний ефект. Саме це суттєво гальмує їх практичне використання і унеможливлює безпосередній перенос здобутих експериментально результатів на натурні об’єкти. З іншого боку, цей фактор обумовлює актуальність розробки математичних моделей пристінних турбулентних зсувних течій з наявними засобами управління, які дозволять оптимізувати геометричні і режимні параметри останніх безпосередньо для очікуваних умов їх експлуатації.

Одним із добре відомих, але досі нерозповсюдженим засобом гальмування пристінної турбулентності є тонкі пластини, що встановлюються на деякій відстані від поверхні обтікання, але в межах примежового шару з метою розрізання притаманних турбулентному руху крупномасштабних вихрових утворень. Згідно англійської назви цих пристроїв – Large Eddy BreakUp devices, вони отримали загальноприйняту зараз абревіатуру – LEBU. Пристрої LEBU пройшли значний обсяг як експериментальних досліджень в різних лабораторіях світу [1-3], так і в льотних випробовуваннях на літаку B-737, який в науково-дослідному центрі NASA ім. Ленглі було переобладнано в льотну лабораторію, а також в льотному експерименті, проведеному у Швеції [3]. У [1] зазначається, що "стосовно важкого транспортного літака при $\mathrm{Re} \approx 3 \div 5 \cdot 10^8$ завдяки пристроям LEBU повний опір зменшився на 2-4%". Ретельний аналіз існуючих результатів та широке коло власних параметричних експериментальних досліджень, виконаних В.Г. Горшковим та В.І. Корніловим [4] дозволили їм вказати більш широкі діапазони ефективності LEBU: до 7-8% щодо зменшення повного опору і до 10-30% – для зменшення опору тертя. Крім того, в [4] також підсумована основна складність практичного застосування цього методу управляння, яка полягає у необхідності створення мініатюрних пристроїв руйнування великомасштабних вихорів турбулентного руху. Враховуючи, що лінійні масштаби цих вихорів мусять відповідати довжині пластин LEBU при вкрай малій товщині останніх, суттєвим фактором стає забезпечення їх необхідної міцності. Саме тому, мабуть, отримали поширення схеми "хонейкомби", що містять не одну, а кілька тонких пластин, розташованих одна над іншою з деяким зсувом по довжині. Такі системи більш ефективні щодо руйнування стійких великомасштабних вихорів і більш міцні конструктивно, але, враховуючи на зростання додаткового опору, обумовленого обтіканням самих пластин LEBU, нарощування кількості цих пластин зводить нанівець позитивний ефект модифікації турбулентності. Тому найбільше поширення отримала компромісна схема з двох пластин – "тандем". Отже, аналізуючи наведену інформацію слід зазначити, що задача оптимізації геометричних параметрів LEBU, а також їх розташування відносно обтічної поверхні є запорукою ефективності цих пристроїв.

Метою даної статті є висвітлення результатів, отриманих автором на шляху побудови математичної моделі турбулентних стаціонарних плоских примежових шарів, що формуються за пристроями LEBU.

**Математична модель.** Наявність LEBU в примежовому шарі передбачає локальну різку втрату монотонності розподілу швидкості у поперечному перерізі до основного напрямку розвитку течії. Вузький слід за LEBU обумовлює різкі деформації профілів інших характерристик руху, таких як кінетична енергія турбулентності, швидкість її дисипації та напруження тертя. Цей фактор суттєво обмежує можливості застосування алгебраїчних моделей турбулентності, примушуючи надати перевагу диференціальним моделям опису динаміки турбулентного руху, які більш істотно і адекватно описують реакцію потоку на локальні збурення. В основу математичної моделі покладено систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial \overline{x}} + \frac{\partial \overline{v}}{\partial \overline{y}} + \frac{\overline{u}}{u_H}\frac{du_H}{d\overline{x}} = 0\,; \tag{1}$$

$$\overline{u}\frac{\partial \overline{u}}{\partial \overline{x}} + \overline{v}\frac{\partial \overline{u}}{\partial \overline{y}} + \overline{u}^2\frac{1}{u_H}\frac{\partial u_H}{\partial \overline{x}} = -\frac{d\overline{p}}{d\overline{x}} + \frac{\partial \overline{\tau}}{\partial \overline{y}}\,; \tag{2}$$

$$\bar{u}\frac{\partial \bar{k}}{\partial \bar{x}}+\bar{\upsilon}\frac{\partial \bar{k}}{\partial \bar{y}}+2\bar{u}\bar{k}\frac{1}{u_H}\frac{\partial u_H}{\partial \bar{x}}=\frac{\partial}{\partial \bar{y}}\left(\bar{D}_k^{eff}\frac{\partial \bar{k}}{\partial \bar{y}}\right)+\mathrm{P}-\bar{\varepsilon} \qquad \textbf{(3)}$$

$$\bar{u}\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial \bar{x}}+\bar{\upsilon}\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial \bar{y}}+3\bar{u}\bar{\varepsilon}\frac{1}{u_H}\frac{\partial u_H}{\partial \bar{x}}=\frac{\partial}{\partial \bar{y}}\left(\bar{D}_\varepsilon^{eff}\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial \bar{y}}\right)+(C_{\varepsilon 1}\mathrm{P}-C_{\varepsilon 2}f_\varepsilon\tilde{\varepsilon})\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{k}} \qquad \textbf{(4)}$$

де (1) є рівнянням нерозривності, (2-4) – рівняння переносу поздовжньої складової швидкості $u$, кінетичної енергії турбулентності $k$ та швидкості її дисипації $\varepsilon$. Рівняння (1-4) подані в обезрозміреному вигляді. Обезразмірювання поздовжньої та нормальної координат $x$ та $y$ виконується за характерним розміром розрахункової області $L$, тобто $\bar{x}=x/L$, $\bar{y}=y/L$. Швидкість зовнішньої течії $u_H$ вважається відомою функцією поздовжньою координати $x$; градієнт обезрозміреного тиску $\bar{p}=p/(\rho u_H^2)$ визначається розподілом зовнішньої швидкості $u_H$ у відповідності до рівняння Бернуллі, $\rho$ – густина, $\upsilon$ – нормальна складова швидкості, $\bar{u}=u/u_H$, $\bar{\upsilon}=\upsilon/u_H$. Безрозмірне напруження тертя $\bar{\tau}=\tau/(\rho u_H^2)$ у відповідності до припущення ньютонівської рідини моделюється формулою Буссінеска $\bar{\tau}=\bar{\nu}_{eff}\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}}$, де $\bar{\nu}_{eff}=\frac{(\nu+\nu_t)}{u_H L}$ - обезрозмірений кінематичний коефіцієнт ефективної в'язкості, $\nu$, $\nu_t$ - кінематичні коефіцієнти молекулярної та турбулентної в'язкості відповідно. Кінетична енергія турбулентності $k$ та швидкість її дисипації $\varepsilon$ обезрозмірюються наступним чином $\bar{k}=k/(\rho u_H^2)$, $\bar{\varepsilon}=\varepsilon L/(\rho u_H^3)$. Коефіцієнти дифузії для $k$ і ε визначаються так $\bar{D}_{k\,eff}=\frac{(\nu+\nu_t/\sigma_k)}{u_H L}$, $\bar{D}_{\varepsilon\,eff}=\frac{(\nu+\nu_t/\sigma_\varepsilon)}{u_H L}$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$, $\mathrm{P}=\bar{\nu}_t\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}}\right)^2$ - член породження $k$.

Система (1-4) розв'язується при наступних граничних умовах.

На обтічній поверхні ( $\bar{y}=0$ ): $\bar{u}=0$, $\bar{\upsilon}=0$,

або в її околі: ( $\bar{y}_*=50\frac{\nu}{\upsilon_* L}$ ): $\bar{k}=\frac{\upsilon_*^2}{u_H^2\sqrt{C_\mu}}$, $\bar{\varepsilon}=\frac{\upsilon_*^3}{u_H^3 k\bar{y}_*}$, $C_\mu=0.09$; (5)

На зовнішній межі ( $\bar{y}\to\infty$ ): $\bar{u}\to u_H(\bar{x})$, $\frac{\partial \bar{k}}{\partial \bar{y}}\to 0$. $\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial \bar{y}}\to 0$; (6)

В початковому розрахунковому перерізі ( $\bar{x}=\bar{x}_o$ ): $\bar{u}=f(\bar{y})$, $\bar{k}=\varphi(\bar{y})$. $\bar{\varepsilon}=\psi(\bar{y})$. (7)

Функції (7) задають початкові профілі розрахункових характеристик, джерелом яких у даному дослідженні виступали інтерполяційні залежності наявних експериментальних даних для $\bar{u}(\bar{y})$, $\bar{k}(\bar{y})$ та їх перерахунки для $\bar{\varepsilon}(\bar{y})$.

**Модель турбулентності.** З метою визначення дифузійних коефіцієнтів в даному методі використано комбіновану алгебраїчно-диференціальну модель турбулентності, що була побудована автором на базі алгебраїчної моделі В.Т. Мовчана та диференціальної двопараметричної моделі Джонса-Лаундера. З першої з цих моделей використано загальний принцип об'єднання залежностей для внутрішньої та зовнішньої областей пристінної течії $\nu_t=\nu_{twake}\tanh\frac{\nu_{twall}}{\nu_{twake}}$ та гарно адаптована до опису турбулентної в'язкості $\nu_t$ у внутрішній області формула $\nu_{twall}=ky\upsilon_*\sqrt{\bar{\tau}}D_m$, де $\upsilon_*=\sqrt{\tau_w/\rho}$ - динамічна швидкість; $k=0.37-0.45$;

$$D_m = \tanh\frac{\sinh^2[\chi_1 y^+\sqrt{\bar{\tau}}]\tanh[\sinh^2(\chi_2 y^+\sqrt{\bar{\tau}})]}{k y^+\sqrt{\bar{\tau}}};\ \bar{\tau} = \begin{cases} 1+\dfrac{dp}{dx}y & \text{при } \dfrac{dp}{dx}\geq 0; \\ 1\Big/\left(1-\dfrac{dp}{dx}y\right) & \text{при } \dfrac{dp}{dx}<0; \end{cases}$$

$\chi_1 = 0.068 - 0.072$; $\chi_2 = 0.223$.

Друга ж, диференціальна $k-\varepsilon$ модель застосована також локально, але у зовнішній області, тобто там, де вона у найбільшій мірі є адаптованою до характеристик турбулентної течії, а саме: $\bar{\nu}_{twake} = C_\mu \bar{k}^2 \big/ \bar{\varepsilon}$.

**Розрахунковий метод.** Для розв'язування рівнянь (1-4) при заданих граничних умовах (5-7) використано неявний двокроковий безітераційний маршовий метод другого порядку точності по обом координатам. Рівняння розв'язуються на нерівномірній в обох напрямках прямокутній сітці. Як правило, кількість вузлів в напрямку розвитку течії складала $i_{max}$=40-70, а вздовж нормалі – $j_{max}$=70-140. Рис. 1 ілюструє результати відтворення розрахунковим шляхом (лінії) розподілів швидкості $u(y)$ та кінетичної енергії турбулентності $k(y)$ в примежовому шарі за LEBU, який був досліджений експериментально в [4] (кола). Рис. 2 демонструє співставлення розрахунків з даними [4] (точки) за локальним коефіцієнтом тертя.

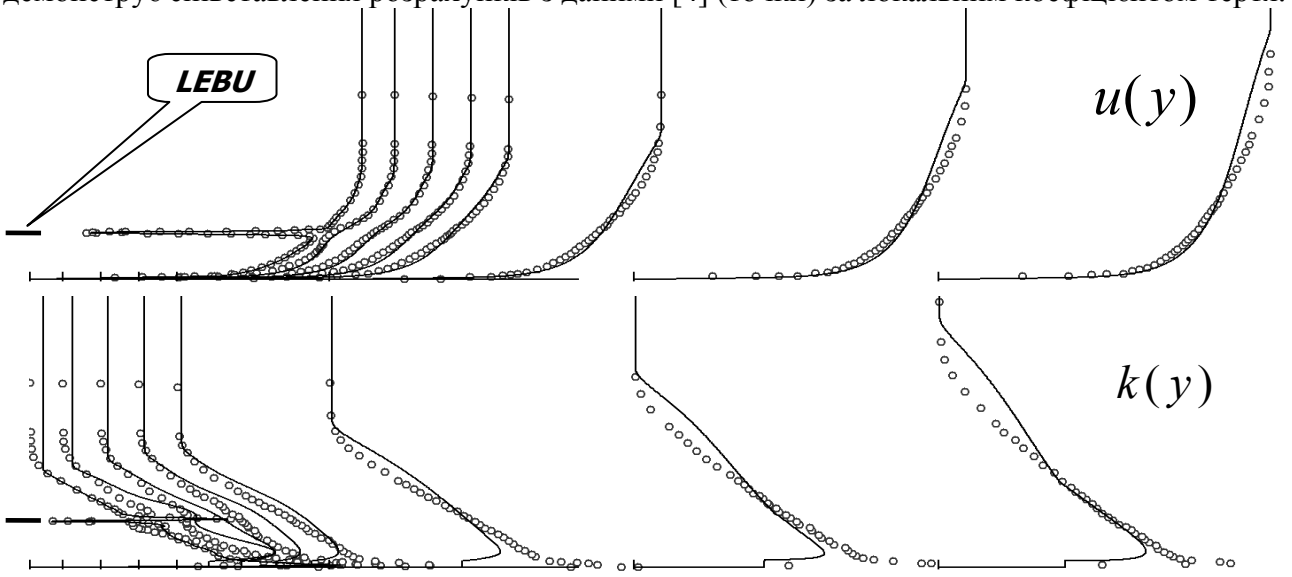



Рис. 1. Формування примежового шару за LEBU ([4]: повітря, $u_H = 25$ m/s, $h/\delta_o = 0{,}46$, $L = 1.2$ m)

$$C_f = \frac{2\tau_w}{\rho u_H^2}$$

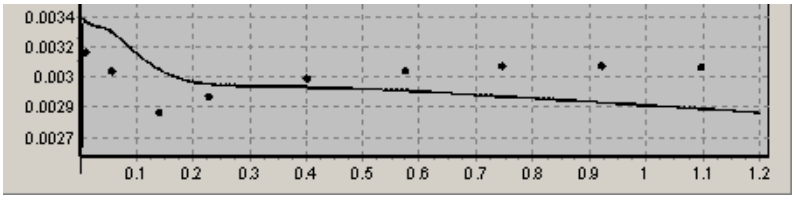



Рис. 2. Розподіл локального коефіцієнта тертя в примежовому шарі за LEBU [4]

## Висновки

Запропоновано модифікацію моделі турбулентності, яка ефективно поєднує алгебраїчний і диференціальний підходи до опису турбулентної в'язкості і дозволяє відтворювати основні фізичні особливості формування турбулентних примежових щарів за наявності маніпуляторів великомасштабною турбулентністю (LEBU).

Структура побудованих структура моделей дозволила ефективно використовувати переваги і мінімізувати вплив слабких сторін кожної з її складових завдяки їх використанню локально у відповідних областях зсувної течії.

На базі розробленого комбінованого підходу до моделювання турбулентної в'язкості створено розрахунковий метод, який дозволяють комбінувати моделювання кількох керуючих впливів.

**Список літератури**


1. *Shmitt V.* Réduction de la traînée de l'avion de transport subsonique. Tendances et perspectives actuelles. // L'Aéronautique et l'Astronautique, 1988, II. – № 129. –p. 4-18.

2. *Fillipone A.* Advanced Topics in Aerodynamics. 1999-2001. Ел. ресурс: http:/www.aerodyn.org

3. *Хефнер Дж.Н.* Проблема снижения сопротивления. Борьба за снижение стоимости горючего. // Аэрокосмическая техника. – 1988. – №7. – С. 143-146.

4. *Горшков В.Г., Корнилов В.И.* Влияние устройств разрушения крупных вихрей на характеристики турбулентного пограничного слоя на теле вращения. Препринт № 4-2003. – Новосибирск, 2003. – 42 с.

УДК 303.725.36:159.9.015

*А.В. Касьянов, доктор технічних наук,*
*В.В. Пахненко, кандидат технічних наук*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ПЕРЕВАГ ПРИНЦИПУ МАКСИМУМУ СУБ'ЄКТИВНОЇ ЕНТРОПІЇ

*Передбачається ряд схем моделювання динаміки активних систем, як динаміки предметних та рейтингових переваг, у тому числі, виникнення й загасання стресових ситуацій. Приводяться кількісні приклади загальної екології, економіки, теорії конфліктів, безпеки активних систем.*

Розглядаються моделі функціонування активних систем, поводження яких істотно залежить від розподілу переваг суб'єкта системи й ряду додаткових умов визначальне ухвалення рішення в багатоальтернативних ситуаціях.

Розподіл переваг суб'єкта активної системи на безлічі альтернатив $S_a$ визначається як рішення варіаційної задачи Джейнса [8], модифікованої стосовно к цілям суб'єктивного аналізу. По теорії інформації, ентропія й інформація виражається через розподіл ймовірностей. У роботі [1] ентропія й інформація виражаються через суб'єктивні переваги, які розподілені на безлічі альтернатив, склад, кількість яких є результатом суб'єктивних подань, попереднього аналізу різних кількісних і якісних характеристик віртуального об'єкта. У цьому випадку можна говорити про «ентропію проблемно-ресурсної ситуації» [1]. Існує формальна аналогія між розподілом переваг і імовірнісних розподілів, і ми можемо використовувати результати теорії ймовірностей, математичної статистики, а також теорії інформації, даючи їм тлумачення в термінах суб'єктивного аналізу.

Нехай $S_a$ це множина альтернатив розмірності N, вихідний стан $\sigma_i \in S_a$, а функціонал $\pi(\sigma_i)$ задає розподіл переваг на $S_a$. Основною складовою функціонала є суб'єктивна ентропія,

$$H_\pi = -\sum_{i=1}^{N} \pi(\sigma_i) \ln \pi(\sigma_i), \qquad \sigma_i \in S_a \tag{1}$$

які є функціями екзогенних («Корисність», «Шкідливість» ресурсів...) і ендогенних факторів, що мають відношення до властивостей індивідуальної психіки. Ентропія (1) має такі властивості:

1. . Якщо всі значення $\pi(\sigma_i)$ однакові, альтернативи однаково кращі, то величина ентропії $H_{\max} = \ln N$ і являє собою максимальне значення ентропії при нормуючій умові $\sum_{i=1}^{N} \pi(\sigma_i) = 1$.

2. При сингулярному розподілі, якщо переваги всіх альтернатив дорівнюють нулю, за винятком однієї альтернативи, величина переваги якої дорівнює одиниці

$$\pi(\sigma_i) = \begin{cases} 0, i \neq k, \\ 1, i = k, \end{cases} \quad (i = \overline{1, N}), \cdot \tag{2}$$

Ентропія мінімальна й дорівнює нулю. Ці умови говорять, що суб'єктивна ентропія максимальна, коли множина $S_a$ це є один клас еквівалентності по перевагах.

3. Суб'єктивна ентропія завжди позитивна.

В окремих випадках вид розподілу $\pi(\sigma_i)$ визначається видом функції ефективності (3):

$$E_\pi = (\sum_{i=1}^{n} \pi(\sigma_i) F(x_i), \alpha, \beta ...), \tag{3}$$

де $x_i$ - вектор екзогенних факторів, $\alpha,\beta$ - ендогенні параметри. Поряд з «абсолютними» перевагами, розглядаються умовні переваги $\pi(\sigma_i|\sigma_k),...\xi(j|q),....$

Висловлюється в різних варіантах принцип максимуму суб'єктивної ентропії. На основі цього принципу визначаються розподіли переваг I роду (предметні) і II роду (рейтингові). Ці переваги називаються канонічними.

У теорії інформації для одержання канонічних розподілів ймовірностей використовується принцип максимуму ентропії [3]. Використання аналогічного підходу приводить до канонічних функцій розподілу переваг. Ми постулюємо принцип оптимальності. Передбачається, що переваги суб'єкта розподілені на множені $S_a$ таким чином, що деякий критерій, що містить функції переваги, здобуває екстремальне значення. Головною частиною критерію є ентропія розподілу переваги $H_\pi$. Мова йде про «принцип максимуму» ентропії. Второю адитивною складового критерію є функція ефективності, що залежить від суб'єктивних переваг і від певної об'єктивної характеристики альтернатив. Третій доданок обумовлений наявністю умови нормировки. Як функція ефективності, так і умова нормировки, у кожному випадку мають вид, що відповідає умовам задачи.

Застосовується наступна схема побудови теорії:
- постулюємо апріорного варіаційного принципу;
- одержання із цього принципу математичної моделі;
- експериментальне дослідження з метою підтвердження прийнятності варіаційного принципу.

Варіаційні принципи подібні тому, що використовується в цій роботі, розглядався раніше й іншими авторами. Наприклад, у роботі Хакена [5] формулюється критерій, основною складовою якого є ентропія розподілу ймовірностей.
У досить загальному виді функціонал може бути взятий у виді:

$$\Phi_\pi = \alpha H_\pi + \beta E_\pi + \gamma N_\pi, \tag{4}$$

де $H_\pi$ - суб'єктивна ентропія, $E_\pi$ - функція суб'єктивної ефективності, $N_\pi$ - нормуюча умова.

Структурні параметри $\alpha,\beta,\gamma$ можуть бути розглянуті як коефіцієнти Лагранжа або як вагові коефіцієнти залежно від завдання. Із цими параметрами будемо зв'язувати ендогенну динаміку переваг. Варіаційна задача (5) є задача на умовний екстремум.

$$\pi_{opt}(\sigma_k) = \arg extr_{\pi(\sigma_k)\in\Pi}\Phi_\pi, \tag{5}$$

де П- клас функцій переваги, з якого вибирається розподіл $\pi$.

Розглянемо $\pi_1 = \dfrac{p_1^{-\alpha}e^{-\beta\bar{\tau}_1}}{p_1^{-\alpha}e^{-\beta\bar{\tau}_1} + p_2^{-\alpha}e^{-\beta\bar{\tau}_2}}$, $\pi_2 = \dfrac{p_{21}^{-\alpha}e^{-\beta\bar{\tau}_2}}{p_1^{-\alpha}e^{-\beta\bar{\tau}_1} + p_2^{-\alpha}e^{-\beta\bar{\tau}_2}}$

$\bar{t}_k = \dfrac{t_k^{req}}{t_k^{dis}}$, $\bar{\tau}_k = \dfrac{\bar{t}_k}{1-\bar{t}_k}$, $\overline{H}_\pi = \dfrac{H_\pi}{\ln 2}$.

Як для екзогенних параметрів, так і для ендогенних параметрів можуть бути використані такі моделі, як наприклад, де $\alpha,\beta$ це координати аттракторів, зокрема розглянемо приклад, аттракторів Лоренца, що дозволить змоделювати збуджений стан психіки. Припустимо, що параметри $\alpha,\beta$ змінюються відповідно до рівнянь

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = ay - bx - lx^2 + f(t), \\ \dfrac{dy}{dt} = -y - zx + cx - my^2 + g(t), \\ \dfrac{dz}{dt} = xy - dz - nz^2 + h(t). \end{cases}$$

Тут введені позначення $\alpha = y, \beta = z$. Одержуємо розв'язання, показане на рис.1.

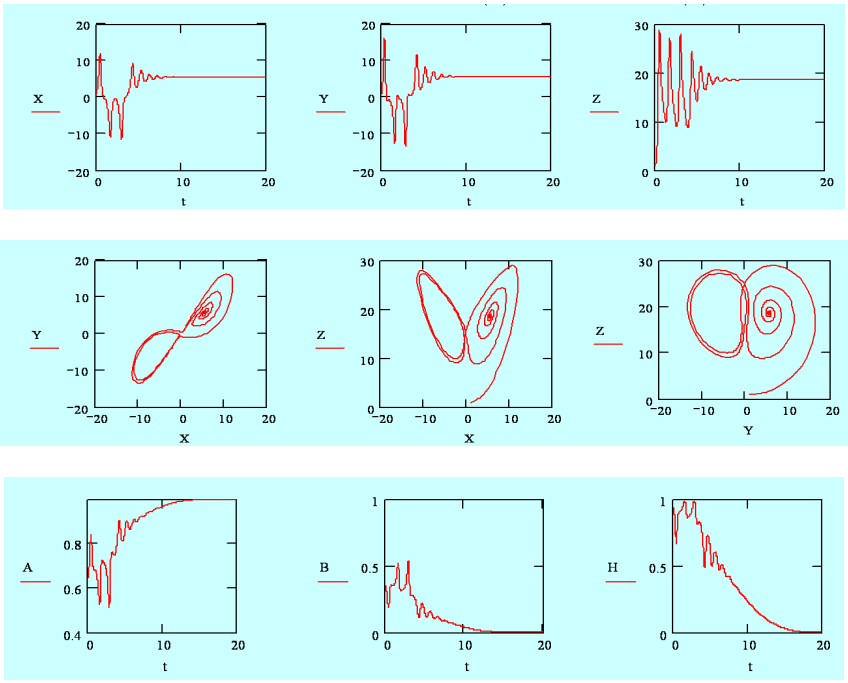



Рис.1.

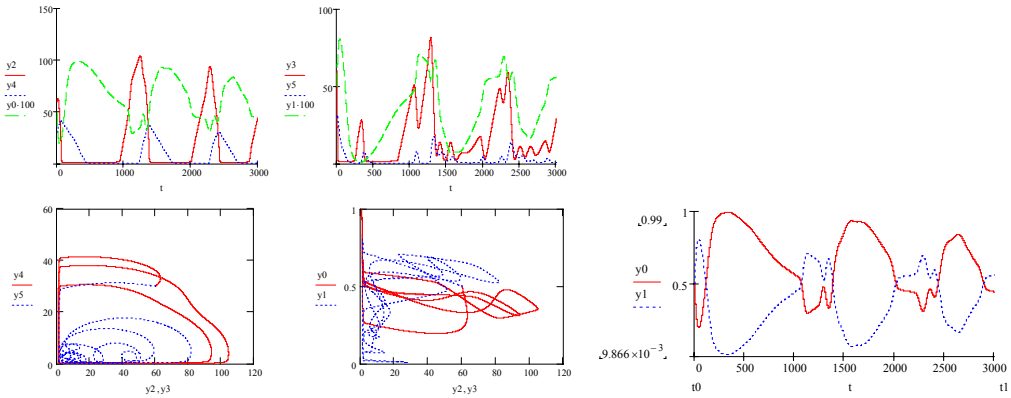



Рис.2.

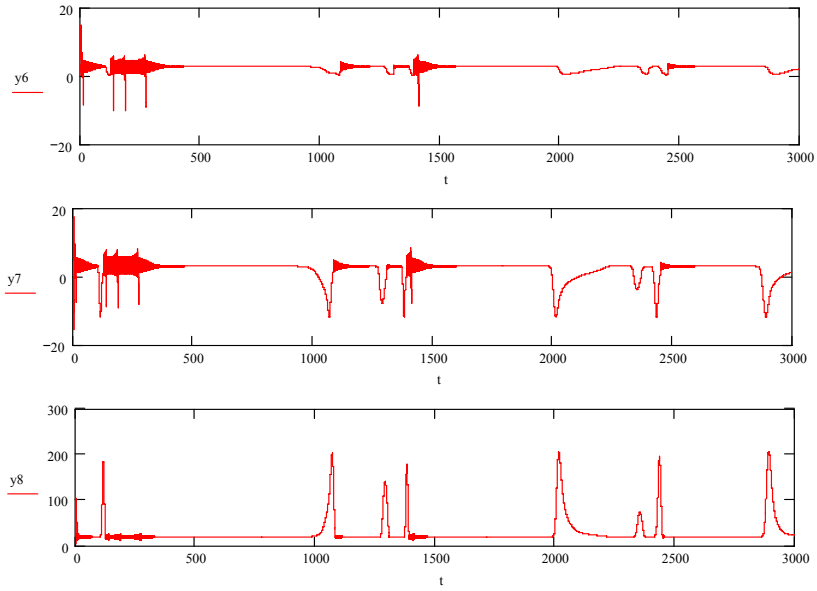



Рис.3.

## Висновки

Висновки й методи, як результат твердження варіаційного принципу, дають можливість більш виразно прогнозувати поводження суб'єкта й одержувати якусь більше конкретну схему на проведення психологічних і соціологічних експериментальних досліджень. Наявність теоретичної моделі, у якій визначені змінні й постійні параметри, що піддаються статистичному виміру, а також співвідношення, що зв'язують їх (наприклад, функція переваги), дає можливість спланувати відповідний експеримент, використовувати результати для керування активними системами.

Істотним розвитком теорії є висловлювання ентропії бар'єрів у багатомірному ентропійному просторі.

Модулюються динаміка активних систем, екзогенний компонент яких пов'язан з економікою, безпекою, розвитком конфліктів, процесами соціодинами.

Додатково вивчається еластичність і твердість психіки.

Показано, що дана технологія може бути застосована до завдань аналізу й синтезу систем і процесів навчання.

## Список літератури

1. *Касьнов В.А.* Субъективный анализ**.** - К.: из-во НАУ, 2007.-512с.
2. *Малинецкий Г.Г.* Математические основы синергетики. Хаос, структуры, вычислительный эксперимент. Изд.4 –М.: КомКнига, 2005.-312с.
3. *Стратонович Р.Л.* Теория информации. –М: сов. радио,1975.-424с.
4. *Панченков А. И.* Энтропийная механіка. –Йошкар-Ола: ГУП «МПИК», 2005.-576с.
5. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. – М.: Мир, 1991.-240с.
6. *Хакен Г.* Принципы работы головного мозга. – М.: Мир, 2001.-351с.
7. *Фишберн П.* Теория полезности для принятия решений.- М.: Наука, 1978.-351с.
8. *Jaynes E.T.* Information Theory and Statistical Mechanics. I and II. - Phys.Rev. №2, №4,1957.

УДК 532.526

*Т.В. Козлова, кандидат технічних наук*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТІКАННЯ ДОЩОВИХ ОПАДІВ ЗІ ЗЛІТНО-ПОСАДОЧНОЇ СМУГИ

*У статті приведені результати побудови математичної моделі течії шару стоку дощових опадів на злітно-посадочній смузі (ЗПС). Основу математичної моделі складають спрощена форма рівнянь руху в'язкої рідини, теорія примежового шару, напівемпірична теорія турбулентності, а також оригінальні підходи автора до математичного описання особливостей взаємодії потоку рідини з нерегулярною мікроструктурою поверхні ЗПС.*

Найважливішою проблемою експлуатації авіаційного транспорту є проблема забезпечення безпеки польотів, яка значною мірою визначається дією на повітряне судно несприятливих метеорологічних явищ і, зокрема, інтенсивних опадів. Дана проблема є актуальною як для надважких широкофюзеляжних і дистанційно-керованих літальних апаратів (ЛА), так для легких і надлегких ЛА. Несприятливий вплив дощу на характеристики літака виявляється також на етапах розгону і пробігу у зв'язку з формуванням шару стоку на поверхні злітно-посадочних смуг (ЗПС). Відповідно до матеріалів Міжнародної організації цивільної авіації (ІСАО) мокра ЗПС є однією з причин скочування або викочування літака при розбігу та пробігу. Так при точному заході на посадку наявність вологи на смузі з'явилося причиною 64% викочувань літака по відношенню до викочувань з інших причин. Рішення задачі відведення води з ЗПС здійснюється на основі експериментальних даних або шляхом використання простих емпіричних моделей стоку. Оскільки використовувані в даний час формули для визначення товщини шару стоку не завжди приводять до результатів, що узгоджуються один з одним, а також з відомими експериментальними даними [1] у широкому діапазоні умов, що представляють інтерес для вирішення даної задачі, правомірний висновок про необхідність удосконалення вживаних підходів до опису формування стоку опадів з ЗПС.

Метою цього теоретичного дослідження є розробка математичної моделі стоку дощових опадів з шорсткої похилої плоскої поверхні ЗПС, яка дозволяє при заданій інтенсивності дощу і для будь-якого заданого перерізу шару стоку від початку його формування розраховувати товщину шару стоку, розподіл швидкості в ньому, а також середню швидкість в цьому перерізі.

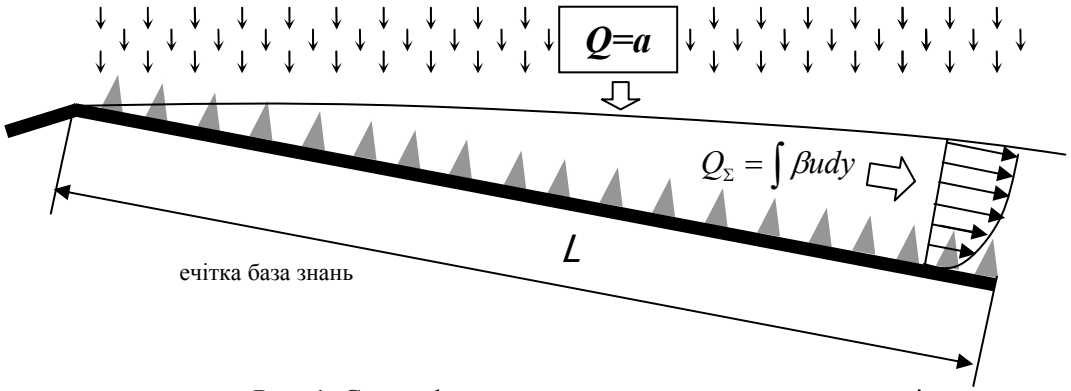



Рис. 1. Схема формування шару стоку дощових опадів на злітно-посадочній смузі з поперечним ухилом

Основу побудови математичної моделі складають наступні рівняння:

1. Рівняння руху в'язкої рідини, в якому враховано дію сили тяжіння і нехтується конвективними складовими і дифузійним членом у напрямі течії та відсутній градієнт тиску

$$\frac{1}{\rho_L}\frac{d\tau}{dy} = -g\sin i \ , \tag{1}$$

де $\rho_L$ – густина рідини (для води $\rho = 1000$ кг/м$^3$), $\tau$ – напруження тертя в шарі стоку, $y$ – координата, відлічувана у напрямі нормалі до обтічної поверхні, $g = 9{,}81$ м/с$^2$ – прискорення вільного падіння, $i$ – ухил ЗПС.

2. Рівняння для визначення напружень тертя при турбулентному режимі течії рідини (формула Бусінеска, в якій нехтується молекулярною в'язкістю)

$$\tau = \rho_L \gamma_{tL} \frac{du}{dy}, \tag{2}$$

де $u = u(y)$ – поздовжня швидкість течії в шарі стоку на відстані $y$ від базової поверхні, за яку прийнята та площина, з якої беруть початок елементи шорсткості поверхні, що обтікається, $\gamma_L$ – кінематичний коефіцієнт турбулентної в'язкості рідини.

3. Формула для визначення кінематичного коефіцієнту турбулентної в'язкості

$$\gamma_{tL} = l\upsilon_*, \tag{3}$$

де $l = ky$ – довжина шляху змішування, $k$ – стала Кармана, $\upsilon_*$ – динамічна швидкість, яка визначається $\upsilon_* = \sqrt{\tau_W / \rho_L}$, $\tau_W$ – дотичне напруження при $y = 0$.

4. Рівняння, що виражає баланс притоку маси води в шар стоку з дощовими опадами та витрати через поперечний переріз шару стоку, який знаходиться на відстані $L$ від початку формування стоку

$$h = \frac{aL}{\upsilon_c} - y_S, \quad \upsilon_c = \frac{Q}{h + y_S}, \tag{4}$$

де $h$ – товщина шару стоку, $\upsilon_c$ – середня швидкість течії по товщині, $a$ – інтенсивність опадів, $Q$ – об'ємна витрата води.

Інтегрування (1) дозволило визначити розподіл дотичних напружень по товщині шару стоку при $y > y_S$, а при $y \le y_S$ зроблене припущення про постійність напружень тертя. Таким шляхом був одержаний вираз

$$\tau = \rho_L g h \sin i\left(1 - \frac{y - y_S}{h}\right) \quad \text{при } y > y_S,$$

який при $y \le y_S$ трансформується до вигляду

$$\tau = \rho_L g h \sin i \ .$$

Останнє рівняння дозволило визначити динамічну швидкість як

$$\upsilon_* = \sqrt{gh\sin i}, \tag{5}$$

а використання виразу для розподілу $\tau$ при $y > y_S$ разом з (2, 3) дало можливість одержати наступний вираз для профілю швидкості:

$$u = \upsilon_*\left(\frac{1}{k}\ln\frac{y}{\Delta} - \frac{y}{hk} + \frac{y_S}{hk}\ln\frac{y\upsilon_*}{\gamma_L} + B\right), \tag{6}$$

де $u$ – швидкість течії на відстані $y$ від поверхні, $\Delta$ – середня висота виступів шорсткості обтічної поверхні, $B$ – постійна логарифмічного закону, що є функцією параметра $\frac{\Delta\upsilon_*}{\gamma_L}$. Для описання розподілення швидкості в діапазоні $y < y_S$ використано лінійну апроксимацію, що задовольняє межовій умові прилипання при $y = 0$ та повністю замикає побудову профілю швидкості. Згідно підходу, що був запропонований Є.О. Шкваром [2], одержані вирази для розрахунків об'ємної витрати рідини з урахуванням захаращення потоку шорсткістю поверхні завдяки використанню функції захаращення

$$\beta = \left(\frac{y}{\Delta}\right)^p \quad \text{при } y \le \Delta, \text{ та}$$

$$\beta = 1 \qquad \text{при } y > \Delta,$$

де $p$ – показник степеня, що враховує характер зміни поперечних розмірів елементів шорсткості по їх висоті. У зв'язку з кусочно-неперервним видом функцій $u(y)$ та $\beta(y)$ товщину шару стоку умовно розділено на три зони, що позначені як «$s$», «$in$», «$out$» та відповідають наступним діапазонам:

$$\text{«}s\text{»} - 0 \le y \le y_S,$$

$$\text{«}in\text{»} - y_S < y \le \Delta,$$

$$\text{«}out\text{»} - \Delta < y \le h.$$

Крім того, залежно від співвідношення товщини шару стоку та середньої висоти шорсткості, виділено дві його ділянки, які відповідають умовам: $1 - h \le \Delta$ та $2 - h > \Delta$. Таким чином, інтегрування виразу

$$Q_n = \int_{y_{1n}}^{y_{2n}} \beta(y) u(y) dy$$

у межах $y_{1n} - y_{2n}$ кожної з виділених вище зон (де $n$ – позначення відповідної зони) привело до розрахункових виразів

$$Q_n = f(h, y_S, \Delta, p, k, B, \upsilon_*(i), \gamma_L),$$

конкретний вид яких відрізняється залежно від визначених вище ділянок та зон шару стоку. Сумарна витрата $Q$ розраховується:

$$Q = Q_s + Q_{in} + Q_{out} \ . \tag{7}$$

Таким чином, формули (4, 5, 7) складають систему нелінійних алгебраїчних рівнянь, що дозволяє розрахувати $\upsilon_c$ і $h$ як функції інтенсивності опадів $a$, довжини стоку $L$, ухилу поверхні $i$, характеристик шорсткості $\Delta$, $p$ та властивостей рідини $\gamma_L$. Розв'язок цієї системи не складає труднощів у разі необхідності визначення $\upsilon_c$, коли задана товщина шару стоку $h$, що досягається шляхом підстановки $h$ у (5, 7), а значення $Q$ у формулу для $\upsilon_c$ (4). У разі необхідності знаходження $h$ при заданих $a, L, i$ для розв'язку цієї системи застосовується ітераційний метод, у якому з метою підвищення збігу використовувалась нижня релаксація, коефіцієнт якої дорівнював $0{,}5 \div 0{,}7$.

Остаточне замикання одержаної системи полягає у визначенні значень $k$, $B$, $p$, $y_S$. Стала Кармана прийнята $k = 0{,}45$ згідно даним, одержаним О.Д. Альтшулем [3]. Величина $y_S$ була призначена як функція характеристик шорсткості на підставі геометричного підходу до знаходження віртуального початку розвитку течії при умовній заміні шорсткої поверхні гладкою, що привело до виразу

$$y_S = \frac{p}{p+1}\Delta.$$

Значення $p$ та вид функції $B = f(\Delta\upsilon_*/\gamma_L)$ були знайдені шляхом проведення чисельного експерименту з використанням даних експериментів ряду авторів, у тому числі і автора цієї роботи, що стосуються течій плівок дощових опадів уздовж похилих поверхонь з бетонним покриттям. Цей експеримент привів до наступних результатів:

$$p = 0{,}2 \div 0{,}3, \quad B = 5{,}75 + 2{,}75 \tanh\left(\ln\frac{\Delta\upsilon_*}{\gamma_L}\right).$$

Результати використання розробленої математичної моделі з метою визначення залежності $h = f(L,\ a)$ демонструються рис. 2, де зображені розрахунки $h$ (суцільна лінія 5), що відповідають умовам проведення експериментів ICAO [1] (крапки). Штрихові лінії

зображують розрахунки, виконані за формулами І.І. Агроскіна (лінія 1), М.М. Павловського (лінія 2), Burke (лінія 3), В.М. Гончарова (лінія 4). Як випливає з представленого зіставлення, розрахунки по розробленій моделі найкращим чином відповідають експериментальним даним ІСАО у всьому діапазоні розрахункових умов ($\Delta = 0{,}2$ мм, $i = 0{,}01$, $L = 0 \div 42$ м, $a = 0{,}423 \div 1{,}058$ мм/хв). Формули І.І. Агроскіна, Н.Н. Павловського, В.Н. Гончарова, Burke, приводять до систематичного заниження розрахункових результатів. Крім того, рис. 2 зображує одержані за розробленим теоретичним підходом профілі швидкості, що також відповідають умовам експериментальних даних ІСАО у кількох перерізах шару стоку, поздовжня координата $L$ кожного з яких приведена над відповідним до неї профілем. Результати співставлення демонструють перевагу розробленої математичної моделі над моделями інших авторів та коректне відтворення динаміки експериментальних даних ІСАО [1].

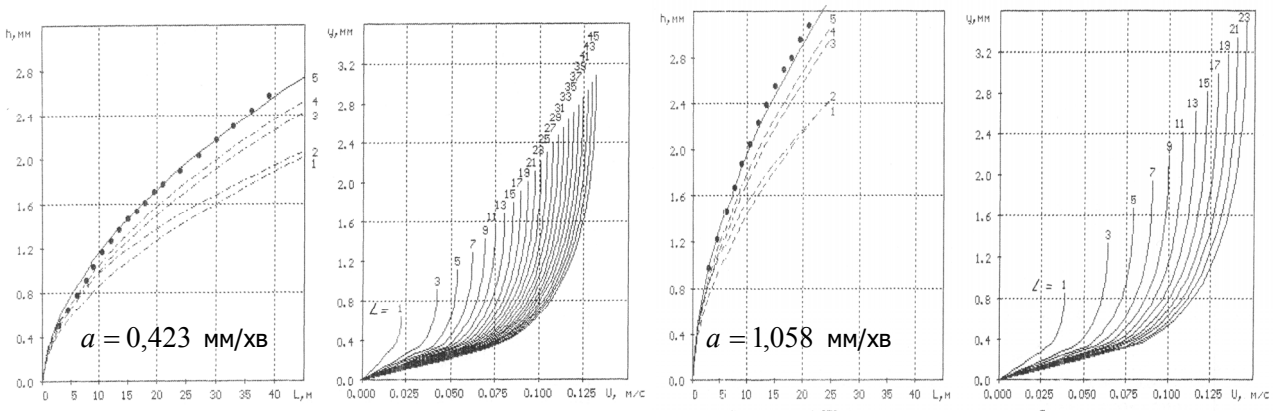



Рис. 2. Результати розрахунків товщини шару водного стоку та профілів швидкості

## Висновки

Представлені результати дозволяють зробити висновок про те, що розроблена математична модель течії шару водного стоку по похилій шорсткій плоскій поверхні забезпечує кращу відповідність експериментальним даним по товщині шару стоку залежно від його довжини, ніж відомі формули, а також є більш інформативною, оскільки дає можливість розрахувати розподіл швидкостей і напружень тертя по товщині шару стоку. Крім того, запропонована модель є у більшій мірі теоретично обґрунтованою, ніж відомі підходи, оскільки заснована на використанні спрощеного представлення рівнянь руху в'язкої рідини, напівемпіричній теорії пристінної турбулентності, універсального логарифмічного розподілу швидкості по товщині течії, детальному описі захаращення шорсткістю потоку, причому містить параметри, що враховують не тільки середню висоту елементів шорсткості, але і їх форму. Остання обставина робить дану модель значно більш універсальною для практичного використання при деякому ускладненні розрахункових формул, що, проте, компенсується простотою програмної реалізації останніх. Найбільш істотною перевагою розробленої математичної моделі є наявність можливості її подальшого узагальнення на більш складний розрахунковий випадок, пов'язаний з урахуванням вітрових дій на формування шару стоку дощу на похилій поверхні ЗПС.

## Список літератури

1. Международная организация гражданской авиации. Восьмая аэронавигационная конференция. Рабочий документ AN Conf /8 – WP/33 от 16.01.1974. – 4 с.

2. *Shkvar E.O.* Mathematical modeling of shear flow control methods. Proc. of the World Congress «Aviation in the XXI-st Century», 2003, Kyiv, NAU, Ukraine, P. 8.105-8.110.

3. *Альтшуль А.Д.* Гидравлические сопротивления. – М.: «Недра», 1982. – 224 с.

УДК 519.41/47

*П.П. Барышовец, к.ф-м.н.*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# О БЕСКОНЕЧНЫХ ГРУППАХ С ДОПОЛНЯЕМЫМИ НЕАБЕЛЕВЫМИ ПОДГРУППАМИ

*Рассматриваются бесконечные неабелевы нильпотентные группы с дополняемыми неабелевыми подгруппами.*

Подгруппа $A$ группы $G$ называется дополняемой в $G$, если в $G$ существует такая подгруппа $B$, что $G=AB$ и $AB=1$. Ф.Холл [1] изучал конечные группы с дополняемыми подгруппами еще в 1937 году. Полное описание произвольных (как конечных, так и бесконечных) групп с таким свойством, получивших название вполне факторизуемых, было получено позже, в 1953 году, Н.В.Баевой [2] (см. также [3] и [4]). В работах С.Н.Черникова [5] и Ю.М.Горчакова [6], было показано, что произвольные вполне факторизуемые группы совпадают с группами, в которых дополняемы все абелевы подгруппы. Вопрос о строении неабелевых групп с дополняемыми неабелевыми подгруппами поставлен С.Н.Черниковым в [7]. В ряде работ автора [9 – 11] изучались конечные группы такого рода. Оказалось, в частности, что они разрешимы и их ступень разрешимости не превышает числа 3. В настоящей работе продолжается изучение групп с дополняемыми неабелевыми подгруппами .

Пусть $G$ – произвольная неабелева группа, обладающая свойством: любая неабелева подгруппа из $G$ дополняема в $G$. Тогда все неабелевы подгруппы и неабелевы фактор-группы группы $G$, а также все прямые произведения вида $G \times H$, где $H$ – абелева вполне факторизуемая группа обладают тем же свойством. Кроме того, фактор группа группы $G$ по ее неабелевому нормальному делителю вполне факторизуема.

Лемма 1.Неабелева нильпотентная группа без кручения содержит недополняемые неабелевы подгруппы.

*Доказательство.*Пусть $G$ – неабелева нильпотентная группа без кручения в которой дополняемы все неабелевы подгруппы. Если $x$– элемент из второго гиперцентра $\Gamma_2$ группы $G$ не содержащийся в центре $Z(G)$ группы $G$ и y – такой элемент группы $G$, что $y \notin C_G(\Gamma_2)$, то y подгруппы $H=<x,y>$, порожденной элементами $x$ и $y$, класс нильпотентности равен 2. Если z=[$a$,b], то, очевидно, <z>=H'. Так как центр $Z_1(G)$ группы $G$ изолирован в $G$, то элементы $a$ и $z$ независимы. Если $b^{\beta}=a^{\alpha}z^{\gamma}$, где α, β и γ – целые числа, то трансформируя это равенство элементом $b$ и, произведя необходимые сокращения, получим $z^{\alpha}=1$; поэтому $\alpha=0$. Значит, и элемент $b$ не зависит от элементов $a$ и $z$.

Но тогда подгруппа

$$S=<a^n> \times <z^n> a\ <b>,$$

где $n$ – некоторое натуральное число, является собственной неабелевой подгруппой конечного индекса из $H$. Значит, подгруппа S дополняема в $H$ и $H$, а, значит, и $G$ содержит конечную неединичную подгруппу. Полученное противоречие доказывает лемму.

Лемма 2. Неабелева нильпотентная группа $G$ с дополняемыми неабелевыми

подгруппами локально конечна.

*Доказательство.* Предположим, что группа $G$ содержит элементы бесконечного порядка.

Если

$$1=A_0 \subset A_1 \subset A_2 \subset \ldots \subset A_{n-1} \subset A_n = G$$

верхний центральный ряд группы $G$, то фактор - группа $G/A_2$ – вполне факторизуема и потому $G/A_2$ – абелева вполне факторизуемая группа. Так как $A_2$ – неабелева группа, то, очевидно, $G=A_2 a L$, где $L \sqcup G/A_2$. Тогда $G/A_1$ будет группой класса нильпотентности 2, причем $A_2/A_1$ содержится в центре группы $G/A_1$. Из полученного противоречия следует, что $G$ – группа класса нильпотентности 2 и $G' \subseteq Z(G)$.

Пусть $G'$ – абелева группа без кручения. Пусть, далее, $x$, $y$ – элементы группы $G$, $[x,y]=z \neq 1$. Тогда $<z>=<x, y>'$ и так как $[x^n,y]=z^n \neq 1$, то $x$ и $y$ – элементы бесконечного порядка. Но тогда все элементы конечного порядка группы $G$ содержатся в ее центре $Z(G)$.и потому составляют подгруппу – периодическую часть $F$ группы $G$. Тогда $G/F$ – неабелева группа без кручения ввиду соотношения $F \cap G'$ и так как $G/F$ – нильпотентная группа с дополняемыми неабелевыми подгруппами, то получили противоречие с леммой 1.

Если периодическая часть $F$ коммутанта $G'$ отлична от единицы и от $G'$, то в группе $G/F$ коммутант $G'/F$ является абелевой группой без кручения и снова получаем противоречие с леммой 1.

Пусть $G'$ – периодическая группа. Тогда, очевидно, элементы конечного порядка группы $G$ составляют подгруппу – периодическую часть $F$ группы $G$ – нормальную в $G$. Так как по предположению $G$ содержит элементы бесконечного порядка, то $F$ – абелева группа.

Пусть $a$ – такой элемент бесконечного порядка группы $G$, что $[F,a] \neq 1$. Тогда ввиду включения $G' \subset F$ подгруппа $F<a>$ нормальна в $G$ и потому $G/F<a>$ – абелева вполне факторизуемая группа. Значит, $G=F<a>$. Но $F<a^2>$ и $F<a^3>$ –недополняемы в $G$ и, значит, абелевы. Тогда $a^2$ и $a^3$, а, значит, и $a = a^3 \cdot a^{-2}$ принадлежат $Z(G)$.

Противоречие. Значит, $G$ – периодическая группа и потому локально конечна. Лемма доказана.

Лемма 3.Если в неабелевой бесконечной бинарно конечной группе $G$ с дополняемыми неабелевыми подгруппами коммутант конечен, то $G = A \times B$, где $A$ – конечная группа с дополняяемыми неабелевыми подгруппами, а B – вполне факторизуемая абелева группа.

*Доказательство.* Пусть $G'$ – конечная группа и $A_1$ – произвольная неабелева конечная подгруппа группы $G$. Пусть $A_2 = G' A_1$. Тогда $G = A_2 a L$, где $L$ – вполне факторизуемая абелева подгруппа конечного индекса в $G$. Так как группа автоморфизмов конечной группы сама конечна, то $|G:C_G(A_2)| < \infty$ и $B = L \cap C_G(A_2)$ – подгруппа конечного индекса из $G$, содержащаяся в $Z(G)$. Так как подгруппа $A= A_2 a K$, где $K$– дополнение к $B$ в $L$, дополняет $B$ в $G$, причем $A \lhd G$, $B \lhd G$, то $G=A \times B$. Лемма доказана.

Теорема. В неабелевой нильпотентной группе $G$ с конечным коммутантом $G'$ тогда и только тогда дополняемы все неабелевы подгруппы, когда $G=A \times B$ и $B$ – абелева вполне факторизуемая , а $A$ – неабелева примарная ( по числу $p$ ) группа дного из сле-

дующих типов:

1) A=$A_1$<b>, где $A_1$ – нормальная элементарная абелева подгруппа и $b^p \in Z(G)$;

2) A – конечная $p$-группа Миллера-Морено;

3) A – прямое произведение с объединенным центром двух групп диэдра порядка 8;

4) A – прямое произведение с объединенным центром двух неабелевых групп порядка $p^3$ и экспоненты $p$ ;

5) $A=((<a_0>\times<a_1>\times<a_2>\times<a_3>)$a $<b_1>)$ a $<b_2>$, где $a_i^p = b_j^p = 1$, $[b_1, b_2]= a_0$, $[a_3, b_j]=a_j$, $[a_i, b_j]=1$, если $i<3$ ($i$=0, 1, 2, 3; j=1, 2);

6) $A=(<a>\times<b>)$a $<c>)$, где $a^4=b^2=c^2=1$, $[b,c]= a^2$, $[a,c]=1$;

7) $A=(<a>\times<b>)$a $<c>)$, где $a^4=b^4=c^2=1$, $[b,c]= b^2$, $[a,c]= a^2$;

8) $A=(<a>\times<b>\times<c>)$a $<d>$, где $a^4=b^2=c^2=d^2=1$, $[a,d]= a^2$, $[b,d]=c$; $[c,d]=1$;

9) $A=<a>$a $<b>$, где $a^8=b^2=1$, [a,b]= $a^{-2}$;

10) $A=(<a_1>\times<a_2>)$a $<b>)$, где $a_1^9=a_2^3=b^3=1$;

11) $A=(<a_1>\times<a_2>\times<b>\times<c>)$a $(<d>\times<f>\}$, где $a_1^p=a_2^p=b^p=c^p=d^p=f^p=1$, $[b,d]= a_1$, $[c,d] = a_2$, $[b,,f] =1$, $[c,,f]= a_1$, $[a_i, f]= [a_i, d]=1$, $i$= 1,2, $p$>2;

12) $A=(<a_1>\times<a_2>\times<b>\times<c>)$a $(<d>\times<f>\}$, где $a_1^p=a_2^p=b^p=c^p=d^p=f^p=1$, $[b,d]= a_1$, $[c,d] = a_2$, $[b,,f] = a_2$, $[c,,f]= a_1^m a_2^n$, $m\neq 0 (\mathrm{mod}\ p)$, $n\neq 0 (\mathrm{mod}\ p)$, $[a_i, f]= [a_i, d]=1$, $i$= 1,2;

13) $A=(<a_1>\times<a_2>\times<a>)$a $(<b_1>\times<b>)$, где $a_1^p=a_2^p= a^p=b_1^p=b^p=1$, $[a,b]= a_2$, $[a_2, b]= a_1$, $[a, b_1]= a_1$, $[a_1, b_1]=[a_2, b_1]=[a_1, b]=1$, $p > 2$;

14) $A=(<a_1>\times<a_2>)$a $(<b_1>\times<b>)$, где $a_1^9=a_2^3=b_1^3=b^3=1$, $[a_1, b]=a_2$, $[a_2, b]=a_1^6$, $[a_1, b_1]=a_1^3$, $[a_2, b_1]=1$;

15) $A=((<a_1>\times<a_2>\times<a_3>)$a $<a>)$a $<b>$, где $a_1^p=a_2^p=a_3^p=a^p=b^p=1$, $[a_i,a]=[a_i,b]=1$, $i$=1, 2, $[a_3,a]= a_1$, $[a_3, b]= a_2$, $[a, b]= a_3$.

*Доказательство.* Необходимость условия теоремы вытекает из леммы 3 и описания конечных неабелевых групп $G$ с дополняемыми неабелевыми подгруппами в работах автора [9 – 11]. Доказательство достаточности несложно и мы его опускаем. Отметим только, что дополняемость неабелевых подгрупп в группе типа 1 следует из леммы 10 [9].

Рассмотрим некоторые свойства произвольной неабелевой нильпотентной группы $G$ с бесконечным коммутантом $G'$ и дополняемыми неабелевыми подгруппами.

Так как длина ряда коммутантов локально конечной локально разрешимой группы совпадает с максимальной длиной ряда коммутантов ее конечных подгрупп [8], а конечные неабелевы нильпотентные группы имеют абелев коммутант, то и коммутант $G'$ произвольной неабелевой нильпотентной группы $G$ с дополняемыми неабелевыми подгруппами абелев.

Так как коммутаторы в группе $G$ перестановочны, то в случае непримарности коммутанта $G'$ существуют коммутаторы $x=[a,b]$ и $y=[c,d]$ примарных порядков по разным простым числам $p$ и $q$. Но тогда $<a, b, c, d>$ – конечная неабелева

нильпотентная группа с дополняемыми неабелевыми подгруппами и непримарным коммутантом. Из полученного противоречия следует примарность коммутанта $G'$.

Пусть $G'$ – $p$- группа.Тогда силовская $p$- подгруппа $P$ группы $G$ нормальна в $G$. Покажем, что если $Q$ –силовская $q$- подгруппа группы $G$ по числу $q \neq p$, то $Q$ – прямой множитель в G. Действительно, если $x$ и $y$ – произвольные элементы групп $G$ и $Q$, а $z$ и $t$ – произвольные неперестановочные элементы группы $G$, то $\langle x, y, z, t \rangle$ конечная неабелева нильпотентная группа с дополняемыми неабелевыми подгруппами. Так как ее коммутант – $p$- группа, то силовская $q$-подгруппа должна выделяться прямым множителем и,значит, $x\,y = y\,x$.

Итак, не теряя общности, можем считать, что $G = P$. Поскольку каждый элемент коммутанта является произведением конечного числа коммутаторов {если точнее, то их степеней}, то в $G$ можно выделить конечную подгруппу $T$ с коммутантом достаточно большого порядка $\{\geq p^4\}$. Если $K$ – нормальный делитель группы $G$, совпадающий с пересечением всех подгрупп сопряженных с дополнением подгруппы $T$ в $G$, то $TK/K \sqcup T$. При неабелевой группе $K$ фактор-группа $G/K$ вполне факторизуема. Из полученного противоречия следует, что $K$ – абелев нормальный делитель конечного индекса в $G$.

Покажем, что $G'K$– абелева группа. Действительно, если $G'K$– неабелева группа, то коммутант конечной неабелевой $p$- группы $G/K$ в ней дополняем. Из полученного противоречия следует, что $G'K$– абелева группа. Очевидно, $G'K \subset Z$– централизаторе коммутанта $G'$ в группе $G$.

## Список литературы


1. *Hall Ph.* Complemented groups- J. L. Math.. Soc. ,1937, 12, p.201-204.

2. *Баева Н.В*. Вполне факторизуемые группы//ДАН СССР.92,1953, №5,-с.877-880.

3. *Черникова Н. В.* Группы с дополняемыми подгруппами // Матем. сб.- 1956 - 39, с.273 - 292.

4.*Черникова Н.В.* К основной теореме о вполне факторизуемых группах.// Группы с системами дополняемых подгрупп. - Киев: Ин-т математики АН УССР, 1972,- с. 49-58.

5. *Черников С. Н.* Группы с системами дополняемых подгрупп.//Матем. сб.- 1954,- 35, с.93 - 128.

6. *Горчаков Ю.М.* Примитивно факторизуемые группы// Учен. зап. Пермск. ун-та, 17, вып. 2; 1960, с.15-31.

7. *Черников С.Н.* Исследование групп с заданными свойствами подгрупп// Укр.мат.журн. - 1969. - 21, №2. - с.193-209.

8. *Черников С. Н.* Бесконечные локально разрешимые группы //Матем. сб.- 1940,- 7, с.35 - 64.

9. Барышовец П.П.Конечные неабелевы 2- группы с дополняемыми неабелевыми подгруппами//Теоретико- групповые исследования.- *Киев: Наукова думка, 1978,- с. 34-50.*

10. Барышовец П.П.О конечных неабелевых р- группах с дополняемыми неабелевыми подгруппами// *Строение групп и свойства их подгрупп.- Киев: Ин-т математики АН УССР, 1978,- с. 39-62.*

11. Барышовец П.П.Конечные неабелевы р- группы с дополняемыми неабелевыми подгруппами//

*УМЖ, 32 1980,* №6- *с. 798-802.*

УДК 681.3.015

*Н.Р. Кондратенко, к.т.н., доцент кафедри ОТ,*
*Т.В. Черняхович, аспірант кафедри ОТ*
*(Вінницький національний технічний університет, Україна)*

# ДО ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ НА ОСНОВІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Проведено аналіз інформаційної безпеки підприємства. Визначено роль та вплив людського фактору на систему інформаційної безпеки підприємства. Розглянуто основні небезпеки, що безпосередньо пов'язані із людським факторомю. Особливу увагу зосереджено на перспективності інтелектуальних технологій, що спрямовані на вирішенні проблем інформаційної безпеки, а зокрема на експертних системах та моделі, що базується на інтервальних нечітких логічних системах.*

При сучасному рівні розвитку інформаційних технологій однією з найбільш серйозних проблем є забезпечення інформаційної безпеки (ІБ) підприємства. Під ІБ підприємства розуміють захищеність інформації і підтримуючої інфраструктури від випадкових або навмисних загроз різного характеру, що можуть призвести до збитку власникам інформаційного ресурсу або користувачам інформації.

Відома велика кількість загроз ІБ, але згідно статистики наданої інститутом комп'ютерної безпеки США – CSI за 2008 рік, зловживання персоналом своїми повноваженнями становить 44% від загроз ІБ. Відомо, що шахрайство співробітників стало причиною закриття близько 100 американських банків за останні 20 років. При цьому, за участю персоналу цих банків нанесено 95% збитків і лише 5% - інші.

Зважаючи на приведену вище статистику, беззаперечним фактом є те, що вирішальну роль в системі ІБ підприємства відіграє саме людський фактор.

Так, основні внутрішні небезпеки, що безпосередньо поєднані з людським фактором такі: недостатня кваліфікація співробітників; неефективна система мотивації; звільнення кваліфікованих працівників; слабка або відсутня корпоративна політика; неякісна перевірка кандидатів при прийнятті на роботу. Також, виділимо основні зовнішні небезпеки, такі як: умови мотивації у конкурентів значно кращі; присутня установка конкурентів на переманювання персоналу; потрапляння співробітників в різні види залежності. Серед небезпек, які є індивідуальними для кожного працівника варто виділити такі як: безвідповідальність; нечесність; лінь; хвороба чи втома; вплив сторонніх осіб; особисті життєві невдачі чи проблеми; особливості характеру; стосунки в колективі тощо. Особливо актуальними розглянуті небезпеки є по відношенню до працівників компанії на яких покладено відповідальність за організацію та контроль системи ІБ.

На сьогодні, існує велика кількість рішень щодо забезпечення ІБ. Але, особливу увагу варто приділити експертним системам та різного роду інтелектуальним системам прийняття рішень [1]. В рамках цих теорій, апарат нечітких множин і нечіткої логіки вже давно з успіхом застосовується для вирішення задач, у яких вихідні дані є слабоформалізованими. На базі даного апарату можуть розроблятися експертні системи, які здатні визначати рівень забезпечення інформаційної безпеки системи. Традиційні нечіткі моделі дають на виході зазвичай точкове значення шуканої величини. Однак, невизначеності, які присутні у системах ІБ, як правило не дозволяють отримати достатньо точне вихідне значення. Тому, для вирішення поставленої задачі є доцільним розробляти моделі, які дають на виході інтервальне значення вихідної величини, в межах якого може знаходитись реальне значення. Дані моделі базуються на інтервальних нечітких логічних системах типу 2 [2, 3], приклад якої наведено на рис.1.

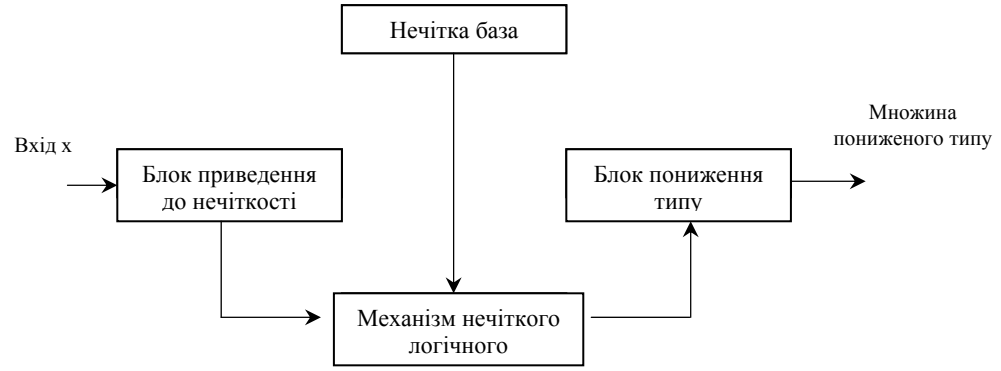



Рис.1. Інтервальна нечітка логічна система типу – 2

Для систем інформаційної безпеки важливою задачею є задача підбору кадрів. Такі задачі можуть розв'язуватись за допомогою нечіткої логічної системи – радник. Така система може мати від двох до декількох баз знань. Як правило, вона має два вихідних значення, одне з яких належить експерту, друге – адміністрації чи представникам певної групи. Розглянемо загальну систему отримання знань, яка представлена на рис. 2.:




Рис. 2. Загальна схема отримання знань

Для НЛР будемо розглядати об'єкт виду:

$$y = f(x_1, x_2, ..., x_n) \qquad (1)$$

НЛР буде вирішувати задачу апроксимації залежності (1) окремо двома нечіткими логічними системами, отримані результати будуть порівнюватись і кінцеве рішення буде виноситись експертом. На рис. 3. видно, що: Блок 1 – перша нечітка логічна система (НЛСф), яка апроксимує залежність (1), використовуючи знання фахівців, та має свій окремий вихід – Yф(X). Блок 2 – друга нечітка логічна система (НЛСе) – будується на основі знань експерта для вирішення поставленої задачі має свій окремий вихід – Ye(X).

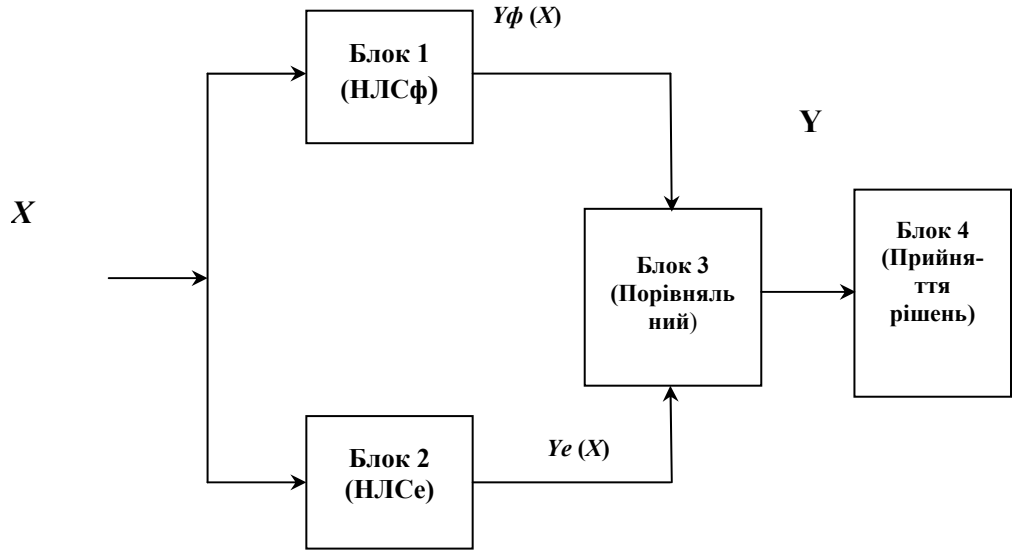



Рис. 3. Структурна схема НСР

Обидва виходи нечітких логічних систем $Yф(X)$, $Ye(X)$, відповідно для НЛСф та НЛСе, мають такі терми: керівник низького рівня (К-Н-Р), керівник середнього рівня (К-С-Р), керівник високого рівня (К-В-Р) .

Матриці нечітких знань створюються для кожної логічної системи окремо і є носієм експертної інформації про причинно-наслідкові зв'язки між вхідними і вихідними змінними. Для НЛСф та НЛСе матриця знань визначає систему логічних висловлень типу:

«Якщо $x_1$=С і $x_2$=С і $x_3$=НП і $x_4$=С і $x_5$=С, тоді $y$=К-В-Р», які зв'язують значення вхідних параметрів $x_1$, $x_2$, $x_3$, $x_4$, $x_5$ з вихідним параметром $y_ф$ або $y_e$, фрагмент загальної матриці знань зображений нижче.

Матриця знань

| $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $Y_c$ | $Y_e$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| В | ВЛ | НП | СН | С | К-В-Р | К-В-Р |
| В | ВЛ | НП | СН | В | К-В-Р | К-В-Р |
| С | ВЛ | НП | СН | В | К-В-Р | К-В-Р |
| … | … | … | … | … | … | … |
| В | ВЛ | П | СР | С | К-В-Р | К-В-Р |
| … | … | … | … | … | … | … |
| В | ВЛ | П | СР | С | К-С-Р | К-В-Р |
| Н | ВЛ | НП | С | В | К-С-Р | К-С-Р |
| … | … | … | … | … | … | … |
| В | ВЛ | СП | С | В | К-С-Р | К-С-Р |
| … | … | … | … | … | … | … |
| В | ВЛ | СП | СЛ | В | К-Н-Р | К-Н-Р |
| В | СЛ | СП | СН | В | К-Н-Р | К-С-Р |
| … | … | … | … | … | … | … |
| Н | СЛ | СП | СН | В | К-Н-Р | К-Н-Р |

Такі системи здатні забезпечити: підбір персоналу; тестування, контроль та оцінку ризиків, що надходять від працівників; оцінку ефективності та контроль виконання персоналом вимог щодо ІБ; підбір, навчання і тренінг персоналу; виконання моніторингу, індивідуального тестування з метою подальшого прийняття рішень керівництвом; підтримку аналітичної діяльності і експертизу при керуванні безпекою; дослідження структурних проблем та ін.

## Висновки

Таким чином, сьогодні актуальними є дослідження спрямовані на розробку нечітких логічних систем, які підтримують системи прийняття рішень для забезпечення ІБ, де вирішальну роль при забезпеченні ІБ відіграє людський фактор.

## Список літератури

1. *Ротштейн А.П.* Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: «УНИВЕРСУМ-Винница», 1999. – 320с.

2. *Mendel J.M.* Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and new Directions. – NJ: Prentice Hall, 2001 – 500p.

3. *Кондратенко Н.Р., Чеборака О.В.* Узагальнююча інтервальна типу-2 нечітка модель для прогнозування часових послідовностей // Матеріал X міжнародної науково-технічної конференції «Системний аналіз та інформаційні технології». – К.: НТУУ «КПІ». – 2008. – С. 207.

УДК 517.518.83(043.2)

*В.К. Репета, канд. фіз.-мат. наук, доцент*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ПРО ТРИГОНОМЕТРИЧНІ ТОТОЖНОСТІ ТА РЕКУРЕНТНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

*Розглянуті деякі типи симетричних тригонометричних тотожностей та встановлено їх зв'язок із багаточленами Чебишова другого роду.*

Серед розмаїття тригонометричних задач виділяються задачі на обчислення значень симетричних тригонометричних виразів. При розв'язуванні таких задач часто використовують апарат елементарної математики. Важливу інформацію про такі вирази можна дістати, розглядаючи багаточлени з коренями тригонометричного вигляду.

**1. Властивості множини чисел** $\cos\frac{2\pi}{2n+1}, \cos\frac{4\pi}{2n+1}, \ldots, \cos\frac{2n\pi}{2n+1}$ $(n \in N)$.

**Приклад.** Знайдемо суму і добуток чисел $x_1 = \cos\frac{2\pi}{5}$ та $x_2 = \cos\frac{4\pi}{5}$:

$$x_1 + x_2 = \frac{1}{2\sin\frac{\pi}{5}}\left(2\sin\frac{\pi}{5}\cos\frac{2\pi}{5} + 2\sin\frac{\pi}{5}\cos\frac{4\pi}{5}\right) = \frac{1}{2\sin\frac{\pi}{5}}\left(\sin\frac{3\pi}{5} - \sin\frac{\pi}{5} + \sin\pi - \sin\frac{3\pi}{5}\right) = -\frac{1}{2},$$

$$x_1 x_2 = \frac{1}{2}\left(\cos\frac{2\pi}{5} + \cos\frac{6\pi}{5}\right) = \frac{1}{2}\left(\cos\frac{2\pi}{5} + \cos\frac{4\pi}{5}\right) = \frac{1}{2}\left(-\frac{1}{2}\right) = -\frac{1}{4}.$$

Отже, числа $\cos\frac{2\pi}{5}$, $\cos\frac{4\pi}{5}$ — корені квадратного тричлена $P_2(x) = x^2 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{4}$, або $P_2(x) = \left(x - \cos\frac{2\pi}{5}\right)\left(x - \cos\frac{4\pi}{5}\right)$. Звернемо увагу на те, що коефіцієнти цього тричлена — раціональні числа.

За аналогією доводиться, що багаточлен третього степеня

$$P_3(x) = \left(x - \cos\frac{2\pi}{7}\right)\left(x - \cos\frac{4\pi}{7}\right)\left(x - \cos\frac{6\pi}{7}\right) = x^3 + \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}x - \frac{1}{8}.$$

Цілком логічно припустити, що й у загальному випадку коефіцієнти багаточлена $n$ – го степеня

$$P_n(x) = \left(x - \cos\frac{2\pi}{2n+1}\right)\left(x - \cos\frac{4\pi}{2n+1}\right) \times \ldots \left(x - \cos\frac{2n\pi}{2n+1}\right)$$

також є раціональними числами. Поставимо задачу обчислення його коефіцієнтів.

Запишемо цей багаточлен у вигляді

$$P_n(x) = x^n - A_1(n)x^{n-1} + A_2(n)x^{n-2} - \ldots + (-1)^n A_n, \qquad (1)$$

де $A_1(n) = x_1 + x_2 + \ldots + x_n$, $A_2(n) = x_1x_2 + x_1x_3 + \ldots + x_{n-1}x_n$, …, $A_{n-1}(n) = x_1x_2\ldots x_{n-1} + \ldots + x_2x_3\ldots x_n$, $A_n(n) = x_1x_2\ldots x_n$, $x_k = \cos\frac{2k\pi}{2n+1}, k = \overline{1,n}.$

Перейдемо до аналізу виразів $A_1(n)$, $A_2(n)$, $A_3(n)$, …, $A_n(n)$. Зрозуміло, що із збільшенням $n$ обчислення значень цих виразів значно ускладнюється. Проте, швидше за все, існують загальні формули, які виражають значення кожного з виразів $A_i(n)$ як функції натуральної змінної $n$.

**Твердження 1.** Коефіцієнти багаточлена (1) у явному вигляді визначаються формулами:

$$A_1(n)=-\frac{1}{2},\ \ A_2(n)=-\frac{C_{n-1}^1}{2^2}=\frac{1-n}{4},\ \ A_3(n)=\frac{C_{n-2}^1}{2^3}=\frac{n-2}{8},$$

$$A_4(n)=\frac{C_{n-2}^2}{2^4}=\frac{(n-2)(n-3)}{32},\dots,\ \ A_k(n)=\frac{(-1)^{\left[\frac{k+1}{2}\right]}}{2^k}C_{n-[(k+1)/2]}^{[k/2]},\ \dots,\ A_n(n)=\frac{(-1)^{\left[\frac{n+1}{2}\right]}}{2^n}.$$

Тут і далі $[x]$ – ціла частина числа $x$.

Ці формули можна отримати, наприклад, за методом твірних функцій для багаточленів вигляду (5). Покажемо тільки, як можна іншим способом ефективно обчислити значення виразу $A_n(n)$.

Обчислимо спочатку значення виразу

$$C(n)=\cos\frac{\pi}{2n+1}\cos\frac{2\pi}{2n+1}\dots\cos\frac{n\pi}{2n+1}, \tag{2}$$

після чого вкажемо на його зв'язок з $A_n(n)$. Помножимо обидві частини співвідношення (2) на додатний вираз

$$S(n)=\sin\frac{\pi}{2n+1}\sin\frac{2\pi}{2n+1}\dots\sin\frac{n\pi}{2n+1}$$

і застосуємо формули $\sin\alpha\cos\alpha=\frac{1}{2}\sin 2\alpha$ , $\sin(\pi-\alpha)=\sin\alpha$ . Дістанемо

$$C(n)S(n)=\cos\frac{\pi}{2n+1}\cos\frac{2\pi}{2n+1}\dots\cos\frac{n\pi}{2n+1}\sin\frac{\pi}{2n+1}\sin\frac{2\pi}{2n+1}\dots\sin\frac{n\pi}{2n+1}=$$

$$=\frac{1}{2^n}\sin\frac{2\pi}{2n+1}\sin\frac{4\pi}{2n+1}\sin\frac{6\pi}{2n+1}\dots\sin\frac{2n\pi}{2n+1}=\frac{1}{2^n}\sin\frac{2\pi}{2n+1}\sin\frac{4\pi}{2n+1}\dots\sin\frac{n\pi}{2n+1}\dots\times$$

$$\times\sin\frac{3\pi}{2n+1}\sin\frac{\pi}{2n+1}=\frac{1}{2^n}\sin\frac{\pi}{2n+1}\sin\frac{2\pi}{2n+1}\sin\frac{3\pi}{2n+1}\dots\sin\frac{(n-1)\pi}{2n+1}\sin\frac{n\pi}{2n+1}=\frac{1}{2^n}S(n)$$

.

Отже, $C(n)S(n)=\frac{1}{2^n}S(n)$, звідси $C(n)=\frac{1}{2^n}$.

Значення $A_n(n)$ відрізняється від значення $C(n)$ лише знаком. Справді, якщо замінити у цьому виразі множники, аргументи яких перевищують $\frac{\pi}{2}$, тобто множники $\cos\frac{2k\pi}{2n+1}$, $\cos\frac{(2k+2)\pi}{2n+1},\dots,\cos\frac{2n\pi}{2n+1}$, де $k=\left[\frac{n}{2}\right]+1$, на відповідні множники за формулою зведення $\cos(\pi-\alpha)=-\cos\alpha$, то дістанемо формулу $A_n(n)=\pm C(n)$ . Якщо число $n$ при діленні на 4 дає в остачі 1 або 2, то $A_n(n)=-C(n)=-\frac{1}{2^n}$; в інших випадках $A_n(n)=C(n)=\frac{1}{2^n}$. Однією формулою це можна записати так:

$$A_n(n)=\frac{(-1)^{\left[\frac{n+1}{2}\right]}}{2^n}.$$

**Твердження 2.** Для кожного натурального значення $n$ виконуються рівності

$$1+A_1(n)+A_2(n)+A_3(n)+\dots+A_{n-1}+A_n(n)=\frac{1}{2^n} \tag{3}$$

$$1 - A_1(n) + A_2(n) - A_3(n) + \ldots + (-1)^n A_n(n) = \frac{2n+1}{2^n} \qquad (4)$$

Доведення. Скориставшись формулою $1 + \cos 2\alpha = 2\cos^2 \alpha$, дістанемо

$$\left(1 + \cos\frac{2\pi}{2n+1}\right)\left(1 + \cos\frac{4\pi}{2n+1}\right)\ldots\left(1 + \cos\frac{2n\pi}{2n+1}\right) =$$

$$= 2^n \cos^2\frac{\pi}{2n+1}\cos^2\frac{2\pi}{2n+1}\ldots\cos^2\frac{n\pi}{2n+1} = 2^n\left(C(n)\right)^2 = 2^n \cdot \left(\frac{1}{2^n}\right)^2 = \frac{1}{2^n}.$$

З іншого боку, розкривши дужки, дістанемо

$$\left(1 + \cos\frac{2\pi}{2n+1}\right)\left(1 + \cos\frac{4\pi}{2n+1}\right)\ldots\left(1 + \cos\frac{2n\pi}{2n+1}\right) = 1 + A_1(n) + A_2(n) + \ldots + A_{n-1} + A_n(n).$$

Отже, прирівнявши праві частини обох формул, дістанемо рівність (3).

Рівність (4) можна довести, наприклад, за методом математичної індукції.

**2. Аналіз багаточленів** $P_n(x)$. Нехай $P_0(x) = 1$. Помічаємо, що між багаточленами $P_0(x),\ P_1(x),\ P_2(x), P_3(x)$ ,… існує зв'язок у вигляді рекурентних співвідношень

$$P_0(x) = 1,\ P_1(x) = x + \frac{1}{2},\ P_n(x) = xP_{n-1}(x) - \frac{1}{4}P_{n-2}(x),\ n \geq 2. \qquad (5)$$

Зазначимо, що схожими рекурентними співвідношеннями визначаються багаточлени Чебишова першого та другого роду – $T_n(x)$ та $U_n(x)$:

$$T_0(x) = 1,\ T_1(x) = x,\ T_n(x) = 2xT_{n-1}(x) - T_{n-2}(x),\ n \geq 2.$$

$$U_0(x) = 1,\ U_1(x) = 2x,\ U_n(x) = 2xU_{n-1}(x) - U_{n-2}(x),\ n \geq 2.$$

Напрошується ідея про можливий зв'язок багаточленів $P_n(x)$ з багаточленами $T_n(x)$ або $U_n(x)$.

Спочатку нагадаємо деякі відомості про багаточлени Чебишова (повнішу інформацію можна одержати у роботі [1] та процитованій там літературі):

$$T_n(x) = \cos(n\arccos x),\ U_n(x) = \frac{1}{n+1}T'_{n+1}(x),\ x \in [-1;1];$$

$$T_n(\cos\varphi) = \cos n\varphi,\quad \sin\varphi \cdot U_n(\cos\varphi) = \sin(n+1)\varphi,$$

$$T_n(x) = 2^{n-1}\left(x - \cos\frac{\pi}{2n}\right)\left(x - \cos\frac{3\pi}{2n}\right)\ldots\left(x - \cos\frac{2n-1}{2n}\pi\right),$$

$$U_n(x) = 2^n\left(x - \cos\frac{\pi}{n+1}\right)\left(x - \cos\frac{2\pi}{n+1}\right)\ldots\left(x - \cos\frac{n\pi}{n+1}\right). \qquad (6)$$

**Твердження 3.** Багаточлени $P_n(x)$ та $U_n(x)$ пов'язані співвідношеннями

$$2^n P_n(x) = U_n(x) + U_{n-1}(x),\ n \geq 1. \qquad (7)$$

Доведення. Скористаємось принципом математичної індукції. Для $n$ = 1 твердження істинне. Нехай твердження виконується для $k = n$ та $k = n-1$, тобто

$$2^n P_n(x) = U_n(x) + U_{n-1}(x),\ 2^{n-1}P_{n-1}(x) = U_{n-1}(x) + U_{n-2}(x),$$

тоді для $k = n+1$ маємо

$$2^{n+1}P_{n+1}(x) = 2^{n+1}\left(xP_n(x) - \frac{1}{4}P_{n-1}(x)\right) = 2x \cdot 2^n P_n(x) - 2^{n-1}P_{n-1}(x) =$$

$$= 2x\left(U_n + U_{n-1}\right) - \left(U_{n-1} + U_{n-2}\right) = \left(2xU_n - U_{n-1}\right) + \left(2xU_{n-1} - U_{n-2}\right) = U_{n+1} + U_n,$$

що й треба було довести.

У розгорнутому вигляді формулу (7) можна записати ще так:

$$\left(x-\cos\frac{2\pi}{2n+1}\right)\left(x-\cos\frac{4\pi}{2n+1}\right)\ldots\left(x-\cos\frac{2n\pi}{2n+1}\right)=\left(x-\cos\frac{\pi}{n+1}\right)\left(x-\cos\frac{2\pi}{n+1}\right)\times$$
$$\times\ldots\left(x-\cos\frac{n\pi}{n+1}\right)+\frac{1}{2}\left(x-\cos\frac{\pi}{n}\right)\left(x-\cos\frac{2\pi}{n}\right)\ldots\left(x-\cos\frac{(n-1)\pi}{n}\right).$$

**Твердження 4.** $P_n(\cos\varphi)=\dfrac{\sin\dfrac{2n+1}{2}\varphi}{2^n\sin\dfrac{\varphi}{2}}$ ( $\varphi\neq 2\pi k,\ k\in Z$ ).

Зауваження. Якщо $\varphi=2\pi k,\ k\in Z$, тоді

$$P_n(\cos 2\pi k)=\lim_{\varphi\to\pi k}\frac{\sin\dfrac{2n+1}{2}\varphi}{2^n\sin\dfrac{\varphi}{2}}=\frac{2n+1}{2^n}=P_n(1).$$

Цілком слушно поставити запитання про вигляд та математичний сенс багаточлена $\overline{P}_n(x)$, який визначається формулами

$$2^n\overline{P}_n(x)=U_n(x)-U_{n-1}(x),\ n\geq 1? \qquad (8)$$

**Твердження 5.** Багаточлен $\overline{P}_n(x)$ має вигляд

$$\overline{P}_n(x)=\left(x-\cos\frac{\pi}{2n+1}\right)\left(x-\cos\frac{3\pi}{2n+1}\right)\ldots\left(x-\cos\frac{(2n-1)\pi}{2n+1}\right),$$

або

$$\overline{P}_n(x)=\left(x+\cos\frac{2\pi}{2n+1}\right)\left(x+\cos\frac{4\pi}{2n+1}\right)\ldots\left(x+\cos\frac{2n\pi}{2n+1}\right).$$

Враховуючи вигляд багаточлена $\overline{P}_n(x)$, назвемо його спряженим до $P_n(x)$.

**Твердження 6.** Багаточлени Чебишова другого роду задовольняють умову

$$U_{2n}(x)=U_n^2(x)-U_{n-1}^2(x),\ n\in N.$$

Доведення. Розглянемо добуток

$$P_n(x)\overline{P}_n(x)=\left(x-\cos\frac{\pi}{2n+1}\right)\left(x-\cos\frac{2\pi}{2n+1}\right)\ldots\left(x-\cos\frac{(2n-1)\pi}{2n+1}\right)\left(x-\cos\frac{2n\pi}{2n+1}\right)$$

.

За формулами (6) маємо

$$4^nP_n(x)\overline{P}_n(x)=U_{2n}(x),$$

тоді як з формул (7) та (8) випливає, що

$$4^nP_n(x)\overline{P}_n(x)=U_n^2(x)-U_{n-1}^2(x).$$

Прирівнявши праві частини обох рівностей, дістанемо задане твердження.

Наприклад, нехай $n=2$, тоді $U_4(x)=U_2^2(x)-U_1^2(x),$ тобто

$$16x^4-12x^2+1=\left(4x^2-1\right)^2-\left(2x\right)^2.$$

## Список літератури

1. Васильев Н., Зелевинский А. Многочлены Чебышева и рекуррентные соотношения./ Квант, 1982 – №1, с. 12-19.

УДК 519.6 : 519.21 : 511

*Н.М. Глазунов, доктор физико-математичних наук*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧИСЛОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ И МЕРЫ

*Рассматривается арифметическое и автоматное моделирование числовых последовательностей. По числовой последовательности, оператору сдвига и мере определяется динамическая систем. Исследуются меры соответствующих динамических систем. Кратко рассматриваются теоретические основы введения мер.*

**Введение**. Напомним определения арифметического и автоматного моделирования числовых последовательностей [1-2]. Арифметическим моделированием числовой последовательности называют последовательность, построенную арифметическими средствами. Последовательностью, построенной арифметическими средствами, называют последовательность, заданную с помощью примитивно рекурсивной функции. Приведем известный пример. Пусть $\xi$ есть некоторое иррациональное число. Тогда последовательность $(\alpha_i)$, определяемая сравнениями

$$\alpha_n = n\xi(\mathrm{mod}1),\ n = 1,2\ldots.,$$

является арифметической. Более того, эта последовательность равномерно распределена по $\mathrm{mod}1$ на полуинтервале $[0,1)$.

Последовательность $(a_n)_{n\geq 0}$ над конечным алфавитом $A$ называется $k$ – автоматной для некоторого целого $k \geq 2$, если существует автомат такой, что при входном значении $n$ на основе $k$, автомат переходит в состояние, в котором выдается выходной сигнал $a_n$.

Пусть теперь $(M,\Sigma,\mu)$ есть вероятностное пространство, на котором определена полугруппа $\{T^k, k = 0,1,2,\cdots)$ преобразований пространства $M$ в себя, причем такая, что для всякого множества $U$ из $\Sigma$ полный прообраз $U$ при отображении $T^k$ принадлежит $\Sigma$, и $\mu T^{-1}U = \mu U$ (инвариантность меры). В эргодической теории вероятностное пространство вместе с определенной на нем вышеописанной группой преобразований называют *динамической системой*. Подмножество $X \subset M$ называют *инвариантным*, если $T^{-1}X = X$.

Далее динамическую систему обозначаем тройкой $(M,\mu,T)$, если не оговорено противное. Если множество $M$ из $(M,\mu,T)$ не представимо в виде суммы непересекающихся инвариантных множеств положительной меры, то говорят, что динамическая система $(M,\mu,T)$ *неразложима*, или *эргодична*. В теории динамических систем находит широкие приложения эргодическая теорема Биркгофа, доказанная также Хинчиным и усиленная Риссом [3], формулировку которой сейчас напомним.

**Теорема ВХР** (Биркгоф – Хинчин – Рисс). *Пусть $\mu$ есть инвариантная мера. Пусть имеется абсолютно суммируемая по мере $\mu$ функция f(x) (т.е. интеграл $\int_M |f(x)|d\mu$ существует). Тогда*

*а) для почти всех (по мере $\mu$) точек $x \in M$ существует предел*

$$\lim_{n\to\infty}\frac{f(x)+f(Tx)+\cdots+f(T^n)}{n} = g(x),$$

$$\int_M g(x)\,d\mu = \int_M f(x)\,d\mu\ ;$$

*б) если динамическая система неразложима относительно меры $\mu$, то почти для всех (по мере $\mu$) точек $x \in M$*

$$\lim_{n\to\infty} \frac{f(x)+f(Tx)+\cdots+f(T^n)}{n} = \int_M f(x)\,d\mu .$$

Далее мы напомним введение меры на множестве бесконечных последовательностей с использованием цилиндрических множеств, а затем рассмотрим введение других мер.

**Бесконечные числовые последовательности, цилиндрические множества, меры и случайные процессы.** Пусть $g \geq 2$ – натуральное число, $X = \{1,2...g-1\}$ - алфавит знаков $1,2...g-1$, $X^\omega$ - множество составленных из знаков $1,2...g-1$ всех бесконечных последовательностей (пространство сверхслов в алфавите *X*). Пусть *r* есть любое натуральное число. *Элементарно цилиндрическим (э.ц.) множеством ранга r* называют множество последовательностей вида

$$a_1...a_r X^\omega,\ a_i \in X .$$

К э.ц.-множествам относят также само множество $X^\omega$ и пустое множество. *Цилиндрическим (ц.) множеством* называют множество, которое может быть представлено как конечное объединение э.ц.-множеств. Напомним известные факты о ц.-множествах [1,4].

**Предложение 1.** ***Пересечение двух ц.-множеств есть ц.-множество. Дополнение к ц.-множеству есть ц.-множество. Таким образом, ц.-множества образуют алгебру.***

Мера $\mu$ определяется на классе э.ц.-множеств следующим способом:

$\mu(X^\omega) = 1$; $\mu(\underline{O}) = 0$, где $\underline{O}$ есть пустое множество; если $U = a_1...a_r X^\omega = U(a_1,...,a_r)$ есть э.ц.-множество ранга *r* , то

$$\mu(U) = \frac{1}{g^r} .$$

Стандартным способом функция $\mu$ продолжается на алгебру цилиндрических множеств.

**Предложение 2.** ***Функция $\mu$ неотрицательна, определена на алгебре ц.-множеств, счетно-аддитивна, т.е. является мерой.***

Из теории меры известно [4], что существует однозначно определенная минимальная $\sigma$-алгебра $\tilde{S}$, содержащая алгебру цилиндрических множеств, на которую однозначно продолжается мера $\mu$. Множества из $\sigma$-алгебры $\tilde{S}$ называют *измеримыми*. Функцию *f*, определенную на пространстве $X^\omega$, называют *измеримой*, если она принимает вещественные значения и если для любого вещественного $\alpha$ множество точек *x* пространства $X^\omega$, удовлетворяющих неравенству $f(x) \leq \alpha$, измеримо. Пусть теперь *S* есть пополнение $\sigma$-алгебры $\tilde{S}$ по мере $\mu$. Тройку $(X^\omega, S, \mu)$ называют *стационарным случайным процессом с дискретным временем*. Приведенное определение стационарного случайного процесса может быть обобщено в нескольких направлениях:

**а) вместо алфавита *X* берется некоторое измеримое пространство $(Y, \Sigma)$, где $\Sigma$ есть $\sigma$-алгебра подмножеств на *Y*;**

**б) вместо пространства $X^\omega$ берется пространство $A^\omega$ бесконечных в обе стороны последовательностей**

$y = (..., y_{-1}, y_0, y_1, ...)$;

**в) цилиндрические множества, определяющие $\sigma$-алгебру $\tilde{S}$ на $A^{\omega}$, определяются как множества вида**

$$A = \{y \mid y = (..., y_{i_1}, y_{i_2}, ..., y_{i_r}, ...) \in A^{\omega} : y_{i_1} \in Y_1, ..., y_{i_r} \in Y_r\},$$

где $i_1, ..., i_r$ - целые числа, $Y_i \in \Sigma$. Пусть $\mu$ - мера с условием $\mu(A^{\omega}) = 1$ на $\tilde{S}$ и $S$ есть пополнение $\tilde{S}$ по этой мере. Тройку $(A^{\omega}, S, \mu)$ называют *случайным процессом с дискретным временем*. Условие стационарности процесса состоит в том, что мера цилиндрического множества не зависит от сдвига на конечное число позиций влево или вправо всех последовательностей данного ц – множества. Функцию, определенную на случайном пространстве, и принимающую значения в некотором измеримом пространстве, называют *случайной функцией*.

**Меры Дирака.** Пусть [0, 1) есть единичный полуинтервал, $T$ – отображение [0, 1) в себя. Удобно расширить $T$ на замкнутый интервал $X$ = [0, 1], положив $T(1) = 1$. Рассматриваем $T$-инвариантные меры на $X$. Во многих случаях, например, при ×2-инвариантном отображении [5], класс $T$-инвариантных Борелевских вероятностных мер на $X$ можно естественно отождествить с инвариантными относительно сдвига Борелевскими вероятностными мерами на $\{0,1\}^{\mathbf{N}}$.

Напомним также, что если у нас есть бесконечная числовая последовательность с оператором сдвига, то траекторией этой последовательности называют множество подпоследовательностей, полученных итерацией оператора сдвига.

Возвращаясь к мерам на $X$, отметим, что на $X$ имеются две граничные меры Дирака $\delta_0$ и $\delta_1$, а также класс мер, параметризованных вещественными $\rho$ из $X$, вида

$$\nu_\rho = (1 - \rho)\,\delta_0 + \rho\,\delta_1.$$

## Выводы

Арифметическое и автоматное моделирование числовых последовательностей представляет активно развивающуюся область исследований. Введение мер, определение и исследование соответствующих динамических систем дает возможность применить методы теории динамических систем в моделировании числовых последовательностей.

### Список литературы


1. *Постников А.Г.* Избранные труды. М.: Физматлит, 2005. – С. 190-266.
2. *Bruce Kitchens*. Symbolic dynamics. One-sided, two-sided and countable state Markov shifts. Universitext. Berlin: Springer-Verlag. - 1998. - 252 pp.
3. *Riez F.* Sur la theorie ergodique // Commentarii math. Helvetici. 17, F. 3 (1944-1945). – P. 221-239.
4. *Халмош П.* Теория меры. М.: Физ.-мат. ГИЗ, - 1953. – 280 с.
5. *Jenkinson O.* A partial order on ×2-invariant measures // Math. Res. Lett. 15, No. 5-6. – 2008. – P.893-900.

УДК 681.5.011

*Н.В. Зосимович, кандидат технических наук, В.Б. Ревенко, кандидат технических наук*
*(Житомирский военный институт НАУ, Украина)*

# МОДЕЛЬ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ОПЕРАТОРА БЕСПИЛОТНОГО ЛА

*На основании структурно-параметрического анализа разработана имитационная модель управляющих воздействий человека-оператора беспилотного летательного аппарата (БЛА). Выполнено обоснование схемы моделирования, осуществлен анализ вариабельности результатов и сформированы требования к динамическим характеристикам системы «беспилотный летательный аппарат-оператор».*

К настоящему времени сложилось два подхода к моделированию управляющих воздействий оператора в системе «БЛА-оператор». Первый, так называемый, структурный подход, основан на предварительном задании структуры характеристик управляющих воздействий оператора и выборе ее параметров путем использования тех или иных правил или критериев [1]. Второй основан на принципах теории оптимальных систем [2-3]. В таком случае полагают, что оператор действует подобно оптимальному регулятору в соответствии с квадратичным функционалом качества. При этом структура модели характеристик управляющих воздействий оператора не задается и при синтезе регулятора учитывается только ряд психофизиологических ограничений, сопровождающих процесс управления.

Проведем имитационное математическое моделирование согласно структурно-параметрическому подходу [5]. Для целого ряда исследований, включающих и определение параметров модели описывающей функции воздействия оператора, достаточно знать модель разомкнутой системы «БЛА-оператор» $W_{раз}(j\omega) = W_л W_c$. В качестве исходной, воспользуемся моделью частоты среза, которая основана на экспериментальном определенном свойстве инвариантности наклона логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) разомкнутой системы, равного –20 дБ/дек для широкого изменения переменных задачи [1]. В случае БЛА таким критерием можно считать вероятность близкого (до нескольких метров) приближения к цели $P_K$. При этом соответствующее критериальное условие имеет вид

$$W_{раз}(j\omega) = \frac{\omega_c}{j\omega} e^{-j\omega\tau_э}. \quad (1)$$

Значения входящих в (1) параметров следующие: частота среза $\omega_c$ и эквивалентного времени запаздывания $\tau_э$ зависят от динамики объекта управления и ширины спектра входного сигнала $\omega_i$. Здесь: $\Delta\tau = 0{,}08\omega_i$; $\Delta\omega_c = 0{,}18\omega_i$; при $\omega_i < 0{,}8\omega_{c_0}$. При более широких спектрах входного сигнала увеличение $\omega_i$ приводит к уменьшению $\omega_c$ – регрессу частоты среза. На рис. 1 получена зависимость параметра $1/\tau_0$ от наклона ЛАЧХ, описывающей функции оператора в районе частоты среза $\omega_{c_0} = \left.\frac{d|W_{on}(j\omega)|}{dtg\omega}\right|_{\omega=\omega_c}$. Приведенная модель частоты среза позволяет оценить качество и устойчивость системы «БЛА-оператор». Из анализа зависимости (рис. 1), можно сделать вывод, что при управлении объектом, имеющим более высокий порядок астатизма, замкнутая система имеет малый запас устойчивости. Полученный вывод совпадает с результатами экспериментальных исследований [6].

Качественная оценка точности слежения для системы, описываемой моделью (1), может быть получена в предположении постоянства спектра входного сигнала $i(t)$ в диапазоне частот от 0 до $\omega_i$, где $S_{ii} = \sigma_i^2 \frac{2\pi}{\omega_i}$, и равенства его нулю при $\omega > \omega_i$.

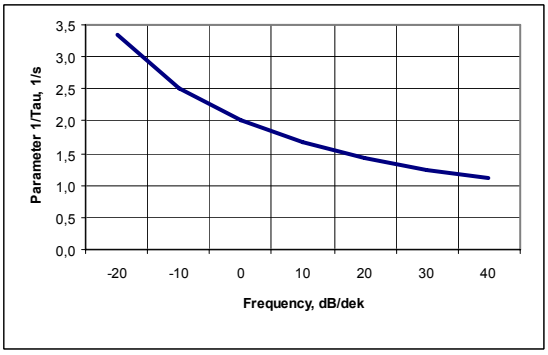



Рис. 1. Зависимость параметра $1/\tau_0$ от наклона ЛАЧХ в районе частоты среза

Из [1] видно, что при увеличении ширины спектра выходного сигнала требование сохранения примерного постоянства ошибки слежения может быть выполнено при увеличении частоты среза. Этот вывод качественно отражает экспериментальные результаты: при больших значениях $\omega_i (\omega_i > \omega_c)$ увеличение точности может быть достигнуто путем уменьшения частоты среза – «регресс частоты среза».

С учетом изложенного выше, предлагается модель на основе спектральной плотности ремнанты $N_c(j\omega)$ и определяется разностью между реакцией системы (элемента) и его линейного эквивалента (от англ. Remnant – остаток), описывающая функции действий оператора по управлению БЛА. Для получения модели спектральной плотности ремнанты воспользуемся моделью процесса восприятия и формирования управляющих воздействий (рис. 2).

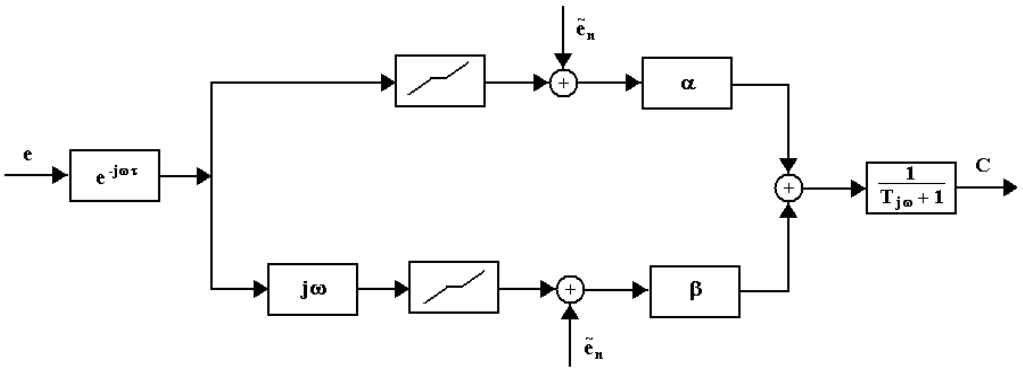



Рис. 2. Блок-схема модели процесса восприятия и формирования управляющих воздействий

Опыт показывает, что намного сложнее моделировать характеристики управляющих воздействий оператора при многоконтурном и многоканальном сложении [2]. В таком случае, с учетом того, что оператор БЛА выполняет несколько подзадач управления $S$ (стабилизации крена, скорости и др.) и реагирует в каждой из них на несколько координат, то модель его реакции на $i-$ю координату можно представить в виде $W_{ОП_i}(j\omega) = W_{S_i} W_S(j\omega)$, где $W_{S_i}$ – простейшая модель вводимой оператором БЛА коррекции на принятие $i-$й координаты в процессе выполнения $S-$й подзадачи управления;

$W_{S_i} = K_{ОП_i} \frac{1 + j\omega T_{L_i}}{1 + j\omega T_{J_i}} e^{-j\omega\tau_i}$; $W_S(j\omega)-$ модель дополнительной коррекции, а также отработка действий оператора в процессе выполнения $S-$й подзадачи (является общей для всех составляющих реакций оператора БЛА на каждый $i-$й стимул). Кроме того, $W_S(j\omega)$ может также описывать действие кинетостатического канала информации, а также нервномышечной системы [4]. Возможное сканирование взгляда, которое происходит при считывании показаний с разных индикаторов, может быть учтено путем увеличения времени запаздывания $\tau_i$ на 0,05 – 0,1 с, а также увеличения уровня спектральной плотности шума. Модель спектральной плотности шума, вводимого оператором БЛА, должна учитывать распределение внимания оператора между всеми подзадачами, выполняемыми им, и стимулами, на которые он реагирует при выполнении каждой подзадачи. Это можно осуществить путем введения коэффициента, определяющего внимание, уделяемое рассматриваемому стимулу. Если оператор БЛА уделяет все внимание задаче управления, то $f_c = 1.$ Тогда при одноконтурном слежении $f^i = 1,$ а при двухканальном для одного контура $f^1 = f,$ а для другого $f^2 = 1 - f,$ где $f \in (0,1).$

Результаты исследований показывают, что адаптация действий оператора БЛА направлена на сохранение инвариантных свойств ЛАФЧХ разомкнутой системы «БЛА – оператор», обеспечение максимальной точности выполнения задачи $\sigma_e^2$ при минимальной загрузке. Это используется в известных подходах к выбору параметров модели характеристик действий оператора в процессе управления БЛА. Воспользуемся двумя из них. Первый основан на использовании так называемых регулирующих правил [8]. Согласно этим правилам выбор параметров модели $W_{ОП}(j\omega)$ должен осуществляться таким образом, чтобы в области частоты среза $\omega_c$ выполнялось условие (1). При различной динамике объекта управления характер действий оператора БЛА также различен и видно, что с увеличением постоянной времени $T$ требует увеличение опережения, вводимого оператором БЛА. Аналогичный вывод был получен и при экспериментальных исследованиях [1].

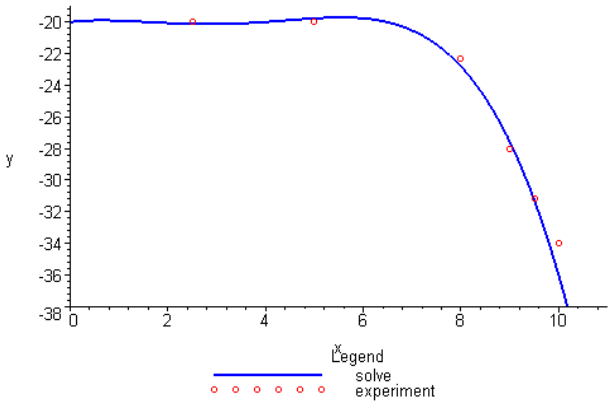



Рис. 3. Результаты математического моделирования передаточной функции оператора БЛА: сплошная линия – расчетные значения; Δ, X – экспериментальные значения из [7]

Второй подход к выбору параметров модели характеристик действий оператора в процессе управления БЛА основан на предположении, что действия оператора формируются исходя из субъективного критерия, учитывающего требования выполнения задачи с наивысшей точностью $\sigma$ при наименьшей загрузке $\lambda$ [7]. Минимизация этого критерия и является целью пилотирования, т.е. $G = \min_{a \in V} I(\sigma, \lambda),$ где $a-$ параметры модели описывающей функции действий оператора БЛА. Существуют различные подходы к определению функциональной зависимости $I$ [4]. Они различаются используемыми

показателями качества выполнения задачи пилотирования и загрузки оператора (рис. 3). В качестве показателей загрузки могут быть использованы постоянные времени опережения $T_{L_k}$ и сглаживания $T_{I_k}$, вводимые оператором в каждом $k-$м контуре.

Численный алгоритм выбора параметров имитационного моделирования характеристик управляющих воздействий оператора БЛА может быть основан на известных методах структурно-параметрической оптимизации [2-3, 8]. В работе [7] рассмотрен один из таких методов, успешно используемый при решении задач математического моделирования системы «БЛА – оператор». Высокая степень соответствия представленных данных указывает на корректность используемых моделей и алгоритма выбора параметров. Это позволяет рекомендовать полученные соотношения для решения прикладных задач проектирования управления БЛА. Следует отметить, что выбор параметров в задачах многоконтурного и многоканального слежения методически не отличается от выбора параметров в задаче одноконтурного слежения, но представляет собой более трудоемкую процедуру с более сложным выражением для минимизируемого функционала.

Результаты моделирования показывают разбросы получаемых частотных характеристик, причем для разных частотных диапазонов их величины различные. Причиной разбросов является шум, вводимый оператором БЛА, вводимый в процессе выполнения задачи. Полагая, что входной сигнал – совокупность гармоник с ортогональными частотами: $i(t) = \sum_k A_k \cos \omega_k t,$ и используя метод коэффициентов Фурье, можно получить сигнал ошибки $e_n$, определяемый ремнантой, вызывает разбросы коэффициентов Фурье, а следовательно, и частотной характеристики $\Phi_c(j\omega)$.

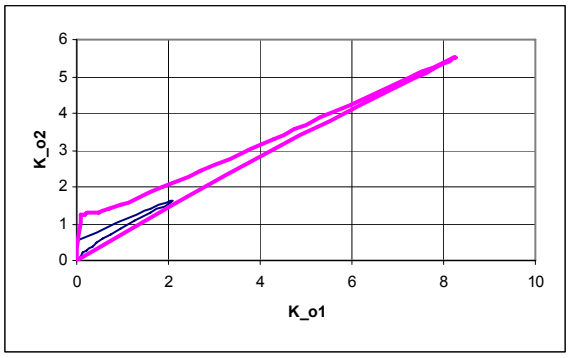



Рис. 4. Области устойчивости БЛА в координатах коэффициентов $K_{O_1}$ и $K_{O_2}$ для задачи стабилизации продольной координаты $x(t)$ на режиме «висения»: —— - первый вариант; —— - второй вариант (область устойчивости – внешняя)

Анализ полученного выражения показывает, что наибольшего разброса получаемых в эксперименте результатов следует ожидать в области низких частот. Это явление следует ожидать и при управлении объектами, требующими от оператора БЛА введения значительного опережения, когда отмечается значительное увеличение дисперсий $\sigma_e^2$ и $\sigma_{\dot{e}}^2$.

На рис. 4 приведены области устойчивости в координатах коэффициентов $K_{O_1}$ и $K_{O_2}$ для рассматриваемых вариантов. Из их сравнения видно, что второй вариант более предпочтителен. Этот вывод совпадает с результатами экспериментальных исследований [1].

## Выводы

1. Выполнено математическое моделирование управляющих воздействий оператора в процессе управления БЛА.

2. Разработана и предложена методика структурно-параметрического имитационного моделирования наземного комплекса управления БЛА.

## Список литературы


1. *Ефремов А.В., Предтеченский А.Н.* Ручное управление в системе «самолет-летчик». – М.: Изд-во МАИ, 1990. – 48 с.
2. *Черноруцкий И.Г.* Методы оптимизации в теории управления. – СПб.: Лань, 2001. – 256 с. : ил.
3. *Брайсон А., Хо-Ю-Ши.* Прикладная теория оптимального управления. – М.: Мир, 1975. – 468 с.
4. Летчик как динамическая система в контуре управления летательным аппаратом: Обзор ЦАГИ. – М.: ЦАГИ, 1984. № 635.
5. *Тарасов В.С., Савченко Е.С.* Параметрическая идентификация объектов эксперимента с распределенными параметрами с использованием системного метода оптимизации.// Труды ЛПИ № 381. – Л.: Изд-во ЛПИ, 1982.
6. *Бюшгенс Г.С., Студнев Р.В.* Динамика продольного и бокового движения. – М.: Машиностроение, 1979. - 152.
7. Методы инженерно-психологических исследований в авиации./ Под ред. Ю.П. Доброленского. – М.: Машиностроение, 1975. – 280 с.
8. *Эйкхофф П.* Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1977. – 296 с.

УДК 621.774.63

*О.Ю. Давыдов, к.т.н., В.Г. Егоров, д.т.н., В.Ю. Зубарев, А.И. Кочегаров*
*(ОАО «Научно-исследовательский институт автоматизированных средств производства и контроля», Россия)*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРОЧНЕНИЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБОПРОВОДА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

*Разработана методика, с помощью которой учитывается эффект упрочнения сплавов как в стационарных, так и в нестационарных процессах формообразования тройников, крутоизогнутых и ступенчатых патрубков, переходников и сильфонов из трубных заготовок в разъемных матрицах.*

В настоящее время установлено, что высокоресурсный, максимально облегченный трубопровод воздушных систем, может быть создан только на основе унифицированных элементов, полученных из трубных заготовок. Особенности унифицированных элементов вызывают необходимость применения специальных методов формообразования. К ним относятся гибка патрубков методом проталкивания трубной заготовки через криволинейный канал с внутренним давлением эластичного наполнителя, гибка патрубков раздачей в штампах, а также штамповка тройников, переходников, облегченных фланцев и сильфонов с использованием операции торцевой осадки и одновременным приложением внутреннего гидростатического давления, создаваемым эластичным наполнителем.

При разработке соответствующих технологических процессов нужно иметь расчетные зависимости для определения энергосиловых параметров, обеспечивающих бездефектное формообразование. Наиболее просто данные зависимости, учитывающие влияние геометрических параметров изделия и свойств материала, можно получить методом верхней оценки на основании математического моделирования пластического течения. Параметром, учитывающим свойства деформируемого металла, при этом является предел текучести при сдвиге $K$. При холодной штамповке имеет место деформационное упрочнение, приводящее к увеличению необходимой внешней нагрузки. Для учета упрочнения служат кривые упрочнения $\sigma_u = f(e_u)$ ($\sigma_u$ - интенсивность напряжений; $e_u$ - интенсивность деформаций), полученные по результатам испытания образцов на растяжение или сжатие. Использование кривых упрочнения возможно при наличии информации об интенсивности деформаций в пластической области.

Для стационарного процесса деформирования (рис.1) – средняя величина интенсивности деформаций может быть принята равной

$$e_m = e_u^o + \frac{N_n \Delta\tau}{2\sigma_o \Delta V} ,$$

где $e_u^o$ - интенсивность деформаций на входе в пластическую зону;

$N_n$ - мощность пластической деформации;

$\sigma_o$ - интенсивность напряжений на входе в пластическую зону;

$\Delta V$ - объем материала, вышедшего из пластической зоны за время $\Delta\tau$.

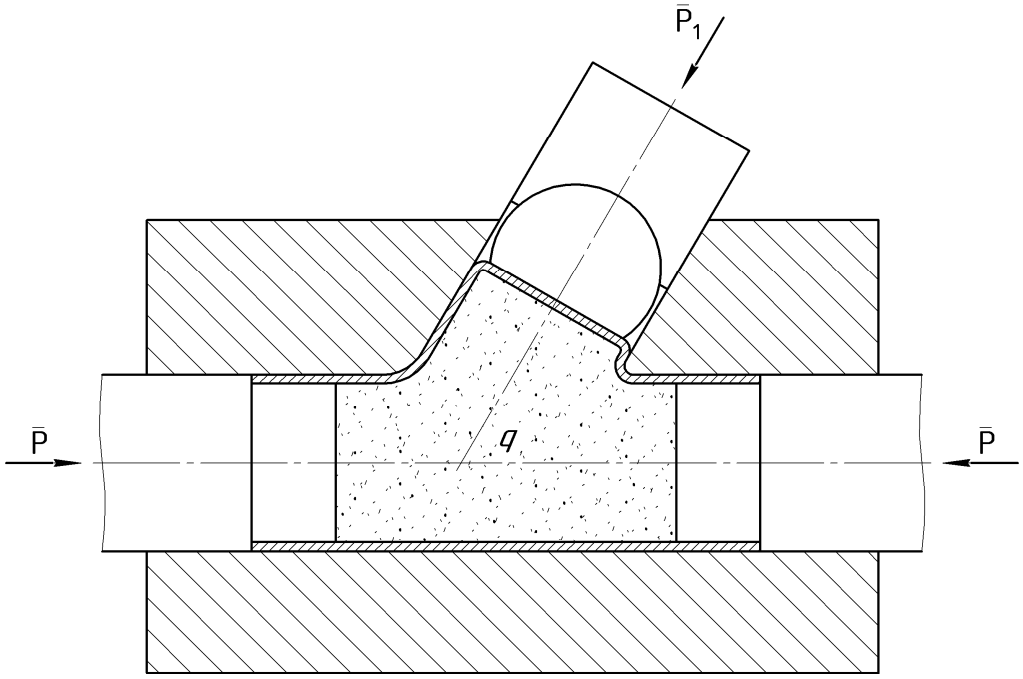



Рис.1. Схема формообразования тройников из трубных заготовок в разъемных матрицах.

В случае нестационарного процесса деформирования (рис.2) среднюю интенсивность деформации рекомендуется определять по формуле

$$e_m = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_0^{\tau} \frac{1}{V_n} \int_{V_n} H dV_n d\tau \,, \qquad (1)$$

где $H$ - интенсивность скоростей деформаций сдвига.

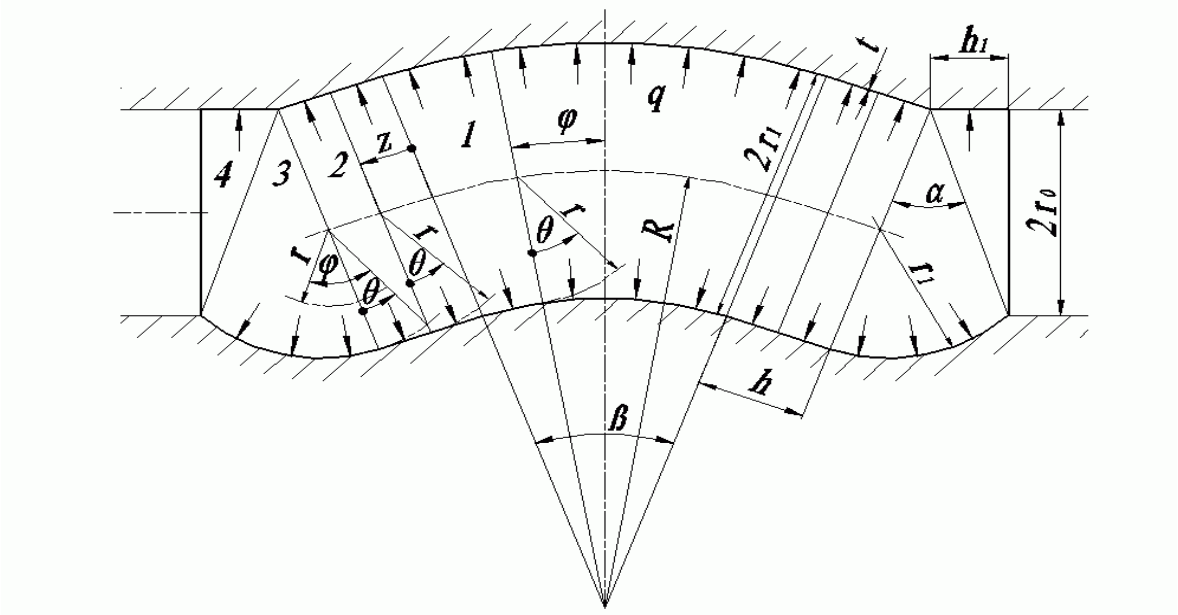



Рис.2. Схема гибки патрубков раздачей в штампах.

Практическое использование (1) сопряжено с значительными трудностями. Поэтому существует необходимость разработки приближенных способов оценки средней интенсивности деформаций.

С целью поиска приближенных способов вычисления (1), пригодных для практического использования, рассмотрим тестовую задачу по определению средней интенсивности деформации при сжатии пластины в условиях плоской деформации (рис.3).

Пренебрегая влиянием контактного трения, поле скоростей, удовлетворяющее условию несжимаемости и кинематическим краевым условиям, принимаем в следующем виде

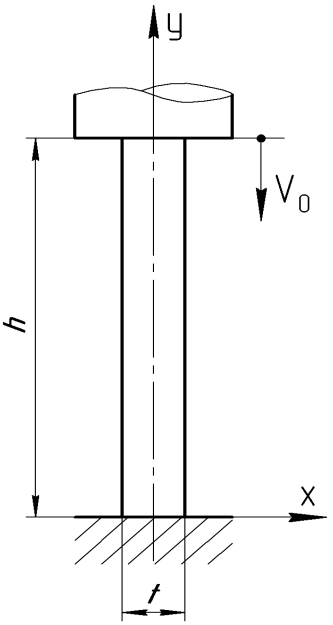


Рис.3

$$v_x = v_o \frac{x}{h};\ \ v_y = -v_o \frac{y}{h}\ \ .$$

Интенсивность скоростей деформаций сдвига определяется соотношением

$$H = \sqrt{2\left(\dot{\varepsilon}_x^2 + \dot{\varepsilon}_y^2\right) + \dot{\gamma}_{xy}^2} = 2\frac{v_o}{h} \qquad (2)$$

Подставляя (2) в (1), находим, что

$$e_m = \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{h_0}{h_1} \qquad (3)$$

где $h_1$ - конечная высота пластины.

Для приближенного вычисления *em* предлагается использовать линейную интерполяцию, т.е. функцию $f(h)$ на отрезке $\lfloor h_1, h_0 \rfloor$ заменить прямой линией. В этом случае средняя интенсивность деформаций в пластической области будет равна

$$\bar{e}_m = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{1}{2} \left(f(h_1) + f(h_0)\right)(h_0 - h_1) = \frac{h_0^2 - h_1^2}{\sqrt{3} h_0 h_1} \qquad (4)$$

С целью оценки точности (4) проведены расчеты средней интенсивности деформаций по (3) и (4) для различных значений $h_1$. Даже при достаточно большой степени деформации приближенные значения $\bar{e}_m$ хорошо согласуются с точными значениями $e_m$.

На основании рассмотренного примера для приближенного вычисления (1) может быть рекомендована следующая зависимость

$$\bar{e}_m = \frac{1}{2\sqrt{3} V_n} \left( \int_{V_n} H_1 dV_n + \int_{V_n} H_0 dV_n \right) \Delta R\,, \qquad (5)$$

где $H_0$, $H_1$ - интенсивности скоростей деформаций сдвига в начальной и конечной стадиях деформирования соответственно;

$\Delta R$ - изменение геометрического параметра изделия в ходе деформирования.

В связи с этим при определении энергосиловых параметров выполняется математическое моделирование кинематики пластического течения для конечной стадии деформирования и величина $H_1$ является известной. Для использования (5) необходимо выполнить моделирование кинематики в начальной стадии деформирования и определить $H_0$, а также найти изменение геометрического параметра $R$. Для гибки раздачей (см. рис.2) в качестве $R$ может быть принят угол изгиба по средней линии патрубка $\beta$.

УДК 656.7.071:658.386

*Д.В. Айдаркин, С.Г. Косачевский, канд. техн. наук*
*(Ульяновское высшее авиационное училище*
*гражданской авиации (институт), Российская Федерация)*

# РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНЫХ СРЕДСТВ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ЛЕТНОГО СОСТАВА НА ОСНОВЕ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА

*Рассматривается применение рекомендованных ИКАО компетентностного подхода, модели ISD и метода DACUM для разработки автоматизированной обучающей системы подготовки летного состава на самолет первоначального обучения Як-18Т.*

В настоящее время по инициативе ИКАО впервые с момента создания этой организации в 1944 году начат процесс фундаментального пересмотра методологии подготовки пилотов гражданской авиации, на основе компетентностного подхода к обучению [1]. Применение компетентностного подхода продемонстрировано ИКАО на примере программы подготовки пилотов в составе многочленного экипажа - Multi-Crew Pilot License (MPL), внедрение которой позволит обеспечить соответствие стандартов и рекомендуемой практики ИКАО новым технологиям в области подготовки персонала и авиационной техники. Основными особенностями программы MPL является отход от оценки уровня подготовки пилотов только по налёту часов, и, как следствие этого, усиление практической составляющей наземной подготовки.

Очевидно, что обеспечение качества профессиональной подготовки пилотов по программе MPL возможно за счет применения новых технических средств и технологий обучения. В свою очередь, решение этих задач требует кардинального пересмотра теоретической базы, на которой основывается методология подготовки пилотов.

При разработке в УВАУ ГА типовой программы MPL для летных учебных заведений Российской Федерации в той или иной степени решались все указанные выше задачи [2,3]. В частности, при разработке автоматизированной обучающей системы (АОС) для подготовки летного состава на самолет первоначального обучения Як-18Т 36 серии компетентностный подход реализован с использованием рекомендованной ИКАО методологии ISD (Instructional Systems Design – разработка учебно-тренировочных систем), что является гарантией качества создаваемых компьютерных средств обучения и обеспечивает необходимую организацию учебного процесса [4]. Особое внимание при этом уделяется определению ключевых аспектов компетентности, которых необходимо достичь в процессе обучения, наиболее эффективного метода их достижения и оценки.

Компетентностный подход предполагает в данном случае четыре основных этапа:

1) сбор и анализ соответствующей документации и информации;

2) достижение согласия среди экспертов в отношении требуемых компетенций или стандартов;

3) проверка достоверности результатов анализа;

4) критический анализ полученной информации.

В качестве экспертов ИКАО рекомендует использовать высококвалифицированных исполнителей, для организации работы которых можно применять метод, известный как «сессия DACUM» (аббревиатура с англ. «Developing A CUrriculuM» – разработка учебного плана). Метод представляет собой «мозговую атаку» с участием экспертов, руководимых группой по разработке учебного курса [5]. Результатом этой работы является достижение единого мнения экспертов в отношении производственных функций. На третьем этапе большую пользу приносят непосредственные наблюдения и интервью на рабочих местах,

дополняющие результаты сессии DACUM, полученные на втором этапе. На четвертом этапе сотрудники, выполняющие данную работу, могут обнаружить альтернативные пути осуществления определенных задач, которые могут оказаться более эффективными. В таком случае эксперты в данной области должны пересмотреть результаты анализа производственных задач.

После проведения опроса группы экспертов осуществляется обработка результатов, целью которой является получение обобщенных данных и новой информации, содержащейся в скрытой форме в экспертных оценках. Например, в ходе обработки результатов опроса четырех экспертов по АОС решались следующие основные задачи:

- определение перечня учебных элементов (УЭ) АОС;
- определение порядка изучения УЭ, рекомендуемого каждым экспертом;
- определение компетентности экспертов;
- определение обобщенной оценки объектов экспертизы;
- определение оптимального порядка изучения УЭ АОС.

По мнению экспертов, весь учебный материал по самолету Як-18Т может быть разбит на 8 дисциплин и 56 учебных элементов. На втором этапе работы перед экспертами была поставлена задача формирования оптимального порядка изучения учебного материала, представленного в АОС. Каждому из четырех экспертов было предложено с помощью попарного сравнения произвести ранжировку 56 объектов экспертизы, в роли которых выступали указанные УЭ. Результаты оценки были записаны в виде матриц отношения очередности УЭ (рис. 1). При заполнении ячеек этих матриц производился анализ простого бинарного отношения очередности.

| | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 3.1 | 3.2 | 3.3 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 | 3.8 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.4 | 4.5 | 4.6 | 4.7 | 4.8 | 4.9 | 5.1 | 5.2 | 5.3 | 5.4 | 5.5 | 5.6 | 5.7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.2 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1.3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 1.4 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 1.5 | 1 | 1 | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 1.6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 1.7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 2.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 2.2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | |
| 2.3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 3.2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 3.3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 3.4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 3.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 3.6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 3.7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 3.8 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 4.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4.2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 4.3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 4.4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 4.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 4.6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 4.7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | |
| 4.8 | 1 | 1 | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 | 1 | | | | | | | | |
| 4.9 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5.1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | | | | | | |
| 5.2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | | | |
| 5.3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | | |
| 5.4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5.5 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | | 1 |
| 5.6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 |
| 5.7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | | 1 |

*Рисунок 1 – Фрагмент матрицы отношения очередности УЭ для одного из экспертов*

Т.к. в результате первичной обработки экспертных оценок были получены четыре различные последовательности изучения учебного материала, представленного в АОС, то возник вопрос о выработке обобщенных оценок объектов экспертизы и единой последовательности изучения УЭ.

Для решения этой задачи использовалась процедура вычисления коэффициентов компетентности экспертов. Коэффициенты компетентности экспертов и обобщенные оценки объектов экспертизы для тех случаев, когда проводится непосредственное числовое оценивание альтернатив, можно вычислить по апостериорным данным, т.е. по результатам

оценки объектов [6]. При этом компетентность экспертов оценивается по степени согласованности их оценок с групповой оценкой объектов.

Алгоритм вычисления коэффициентов компетентности экспертов и обобщенной оценки объектов экспертизы производился по следующим рекуррентным формулам [7]:

$$x_i^t = \sum_{j=1}^{m} x_{ij} k_j^{(t-1)}, \quad i = 1, 2, \ldots, n, \tag{1}$$

$$\lambda^t = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} x_{ij} x_i^t, \quad t = 1, 2, \ldots, \tag{2}$$

$$k_j^t = \frac{1}{\lambda^t} \sum_{i=1}^{n} x_{ij} x_i^t, \quad j = 1, 2, \ldots, m, \tag{3}$$

где $m$ – число экспертов (в данном случае $m = 4$);

$n$ – число объектов экспертизы (число УЭ, т.е. $n = 56$).

Вычисления начинались с $t = 1$. Начальные значения коэффициентов компетентности принимались одинаковыми и равными $k_j^0 = \frac{1}{m} = 0{,}25$. В табл. 1 приведены значения коэффициентов компетентности экспертов, полученные после пяти циклов применения рекуррентных формул (1 –3).

*Таблица 1*

| Эксперт | №1 | №2 | №3 | №4 |
|---|---|---|---|---|
| Коэффициент компетентности | 0,250769 | 0,249850 | 0,251259 | 0,248122 |

Т.к. эксперты производили измерение объектов в порядковой шкале методом ранжирования, то величины $x_{ij}$ есть ранги. Поэтому итоговой задачей обработки полученных экспертных оценок было построение обобщенной ранжировки по индивидуальным ранжировкам экспертов.

Каждую ранжировку $y_j$ можно представить в виде матрицы парных сравнений, элементы которой определяются следующим образом:

$$y_{ik}^j = \begin{cases} 1, & x_{ij} \le x_{kj}, \\ 0, & x_{ij} > x_{kj}, \end{cases}$$

где $x_{ij}$, $x_{kj}$ – ранги, присваиваемые $j$-м экспертом $i$-му и $k$-му объектам.

Метрика в пространстве ранжировок (между матрицами парных сравнений экспертов) вычислялась по формуле:

$$D_{jl} = \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} \left| y_{ik}^j - y_{ik}^l \right|, \quad j, k = 1, 2, \ldots, m. \tag{4}$$

Используя данную метрику, можно определить обобщенную ранжировку как такую матрицу парных сравнений, которая наилучшим образом согласуется с матрицами парных сравнений каждого эксперта [8]. Примером задания такой точки может быть медиана

$$\left\| y_{ik}^* \right\| = \underset{\|y_{ik}\|}{arg\,min} \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} \left| y_{ik}^j - y_{ik} \right|. \tag{5}$$

Однако, если при построении обобщенной матрицы парных сравнений учитывается компетентность экспертов путем введения коэффициентов компетентности $k_j$, то соотношение (5) следует записать в виде

$$\left\| y_{ik}^{*} \right\| = \underset{\|y_{ik}\|}{arg\,min} \sum_{j=1}^{m} \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{n} k_j \left| y_{ik}^{j} - y_{ik} \right|. \quad (6)$$

Тогда обобщенная ранжировка, доставляющая минимальное значение введенной метрике, находится по следующему правилу:

$$y_{ik}^{*} = \begin{cases} 1, & b_{ik} \geq \frac{1}{2}, \\ 0, & b_{ik} < \frac{1}{2}, \end{cases}$$

где $b_{ik} = \sum_{j=1}^{m} k_j y_{ik}^{j}$ – вероятность того, что *i*-й объект предпочтительнее *k*-го объекта.

С помощью методики, описанной выше, была получена обобщенная матрица отношений очередности УЭ, на основе которой определен порядок изучения учебного материала, который можно считать оптимальным по обобщенному мнению экспертов.

В течение 2008-2009 учебного года АОС прошла апробацию в процессе подготовки курсантов – пилотов к выполнению учебных полетов на самолете Як-18Т 36 серии. Результаты этой работы были доложены на летно-технической конференции с участием руководителей летных учебных заведений гражданской авиации Российской Федерации, которая проводилась в Ульяновске в апреле 2009 года.

В рамках дальнейшей работы по созданию методического обеспечения учебно-летного процесса по программе MPL в настоящее время в училище разрабатывается комплекс программ предтренажерной подготовки, что позволит обеспечить более тесное согласование теоретического этапа обучения, проводимого с использованием описанной выше АОС, и этапа тренажерной подготовки, для проведения которой используются тренажеры нового поколения.

**Список литературы**


1. Подготовка персонала. Правила аэронавигационного обслуживания : Doc. 9868. – Монреаль : ИКАО, 2006.

2. *Косачевский С.Г.* Разработка методологии автоматизированной профессиональной подготовки летного состава гражданской авиации / Збірка науковых праць институту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Э. Пухова «Сучастні тренажерно-навчальні комплекси та системи». Том 1. Київ, 2007. – С.91-101.

3. *Айдаркин, Д.В.* Использование компетентностного подхода для разработки систем автоматизированного обучения летного состава / *Д.В. Айдаркин, С.Г. Косачевский* // Научный вестник УВАУГА. – 2008. - № 1.- С.170-178.

4. *Clark, D.R.* Introduction to Instructional System Design. July 26, 2006. – Режим доступа: http://www.nwlink.com/~donclark/hrd/sat1.html. – Заглавие с экрана.

5. *Адамс, Р.Е.* DACUM: Подходы к изучению учебного плана и оценка профессионального обучения / Р.Е. Адамс. – Оттава, Канада, 1975.

6. *Добров, Г.М.* Экспертные оценки в научно-техническом прогнозировании / *Г.М. Добров, Ю.В. Ершов, Е.И. Левин, Л.П. Смирнов.* – Киев: Наукова думка, 1974.

7. *Павлов, А.Н.* Методы обработки экспертной информации: учебно-метод. пособие / *А.Н. Павлов, Б. В. Соколов.* – СПб.: ГУАП, 2005.

8. *Бешелев, С.Д.* Математико-статистические методы экспертных оценок / *С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич.* – М.: Статистика, 1980.

УДК 62.50

*В.К. Антонов, к.т.н. (Национальный авиационный университет, Украина)*

# МЕТОДЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ И АДАПТИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛОВ С КРАТНЫМИ ИНТЕГРАЛАМИ

*Предложены методы аналитического конструирования регуляторов и адаптивной идентификации, основанные на применении интегральных функционалов с кратными интегралами.*

Актуальность и проблемность построения регуляторов с заданным качеством переходных процессов состоит в предъявлении требований некоторого качества к системе, замкнутой регулятором, до его нахождения. Но при этом наперед неизвестно, какие показатели качества максимально достижимы. Такие требования можно оценивать для уже замкнутой регулятором системы. Они являются не исходно определяющими поведение системы, а результатом синтеза. На самом деле показатели качества определяются в результате анализа уже созданной - замкнутой системы. Он принципиально, в силу причинности, возможен лишь по отношению к результату синтеза. В задачах идентификации необходимо формировать идентифицирующее управление до определения искомых параметров, но поскольку сам факт идентифицируемости устанавливается по аналогии с управляемостью (для линейных объектов) на основе знания этих параметров, получается, что некоторым прямым образом, не дополняя процедуру нахождения управления, пусть даже не очень заметным - внесением априорной информации об объекте, принципиально невозможно, и при этом, следовательно, даже не помышляя о качестве переходных процессов идентификации, ее надежности, запасе идентифицируемости, робастности идентифицирующего управления. В обоих случаях имеем не разрешимые задачи, поскольку в них нужно знать ответ наперед – до его получения. Летательные аппараты и их автопилоты – характерный пример. Аналогичная ситуация имеет место для любых управляемых объектов. Для таким образом противоречия между общественной потребностью и невозможностью прямого решения этих задач, характерна принципиальная неустранимость, которую следует не преодолевать, а попытаться возможно более существенно ослабить. И практически это достижимо применением в обоих случаях – задач управления и идентификации – вариационных принципов. Мы будем использовать именно их потому, что в любом случае при численной реализации на компьютерном уровне приходим к поисковым процедурам, связанным с нахождением экстремумов. Итог состоит в том, что, с одной стороны, контекст «поисковости» сохраняется и ничем не заменяется, а с другой стороны, численная процедура как реализация структурно компактного принципа, отождествляется с решением задачи «прямым» (для вариационных методов) способом. Реалистичность предлагаемого подхода подтверждается компьютерным моделированием. Когда решаются вариационные задачи с функционалами, имеющими физический смысл (время, топливо, энергия), результат оптимизации также имеет физическое содержание. Он при этом может быть измерен физическим прибором. Но в задачах стабилизации и идентификации функционалы никакого физического содержания не имеют. Следовательно, для них невозможно придумать некоторый предполагаемый «функционалометр» по аналогии с амперметром. Таким образом, особенно заботиться о минимальности не имеющего физического содержания функционала при решении практических задач просто не нужно. Асимптотически устойчивая система всегда одновременно и оптимальна. На любой такого рода случай найдется множество функционалов, заботиться о минимальности которых незачем. То же относится и к задачам идентификации. Интересен в связи с этим также и тот факт, что в задачах идентификации наперед не известно, какие значения параметров необходимо стабилизировать. Но выход при постановке задачи есть, и состоит в том, что стабилизировать мы будем производные от параметров. Они в установившемся режиме при

правильной параметризации должны быть равны нулю. Вывод – имеем что-то вроде принципа регулирования по скорости изменения состояния. Исключительный случай представляет ситуация «структурной неидентифицируемости». Чтобы его продемонстрировать, достаточно привести пример «злокозненного» в отношении решения задач идентификации поведения параметров, используя для этого при построении модельного примера уравнения настройки.

Оптимизируем дифференциальную управляемую систему

$$\dot{X} = F(t, X, u) \tag{1}$$

по интегральному функционалу с интегралом второй кратности

$$I = \int_0^{\infty}\int_0^{\infty} \omega(t, X, u, \dot{u}, \dot{V}, V)(dt)^2 , \tag{2}$$

для которого при бесконечном верхнем пределе зависимость подынтегрального выражения от производной от функции Беллмана имеет принципиальный характер, иначе для положительно определенного подынтегрального выражения функционал расходится. В этом случае устойчивость (оптимальность) приобретает новое качество - она может оцениваться только на конечном интервале времени. Из определения функции Беллмана согласно принципу оптимальности для функционала (2)

$$V(t, X) = \int_t^{\infty}\int_t^{\infty} \omega(\tau, X, u_{opt}, \dot{u}_{opt}, \dot{V}, V)(d\tau)^2 . \tag{3}$$

Продифференцируем (3) дважды по времени - нижнему пределу интегрирования

$$\dot{V} = -\int_t^{\infty} \omega(\tau, X, u_{opt}, \dot{u}_{opt}, \dot{V}, V)d\tau ; \qquad \ddot{V} = \omega(t, X, u_{opt}, \dot{u}_{opt}, \dot{V}, V) . \tag{4}$$

Уравнения (4) относительно функции Беллмана представим в нормальной форме, для этого сперва подставим производную от функции Беллмана из первого уравнения системы (4) во второе

$$\ddot{V} = \omega\left[ t, X, u_{opt}, -\int_t^{\infty} \omega(\tau, X, u_{opt}, \dot{u}_{opt}, \dot{V}, V)d\tau , V \right]. \tag{5}$$

Нормальная форма записи уравнения (5) имеет вид

$$\dot{V}_1 = V_2 ; \qquad \dot{V}_2 = \omega\left[ t, X, u_{opt}, -\int_t^{\infty} \omega(\tau, X, u_{opt}, \dot{u}_{opt}, V_2, V_1)d\tau , V_1 \right] = -\Omega . \tag{6}$$

Согласно первому уравнению системы (6) при положительно определенном подынтегральном выражении функционала (2) производная по времени от функции Беллмана отрицательна; согласно второму уравнению вторая производная положительна. Следовательно, функция Беллмана в этом случае затухает с монотонно убывающей скоростью. Исходный функционал (2) с кратным интегралом придает поведению функции Беллмана это новое качество, что принципиально отличает ее поведение для однократного интеграла в функционале, когда вторая производная может менять знак. В технических задачах это приводит к монотонности изменения нагрузок, уменьшению повреждаемости (в том числе при маневрировании), что существенно для больших по массе объектов управления. Из принципа оптимальности системе (6) поставим в соответствие систему функционалов (векторный функционал – многокритериальная задача)

$$I_1 = \int_0^{\infty} - V_2 dt ; \qquad I_2 = \int_0^{\infty} - \omega(t, X, u, \dot{u}, V_2, V_1)dt = \int_0^{\infty} \Omega dt . \tag{7}$$

Запишем для системы функционалов (7) соответствующую систему уравнений Беллмана

$$-\frac{\partial V_1(t,X)}{\partial t} \equiv \min_{u} \left\{ \; -V_2(t,X,u) + \frac{\partial V_1(t,X)}{DX^T} F(t,X,u) \; \right\}; \tag{8}$$

$$-\frac{\partial V_2(t,X,u)}{\partial t} = \max_{u,\dot{u}} \left\{ \; \Omega + \frac{\partial V_2(t,X,u)}{DX^T} F(t,X,u) + \frac{\partial V_2(t,X,u)}{Du^T} \dot{u} \; \right\}.$$

В системе (8) первое уравнение выполняется тождественно. Из второго уравнения находятся функция Беллмана, управление и его производная, или только производная при известном текущем значении управления. В функционале (2) в зависимости от задачи подынтегральная функция может выбираться отрицательно определенной.

Приведенные построения можно сформулировать в виде теоремы: функционал с $n$ - кратным интегралом эквивалентен системе из $n$ функционалов, и его экстремум удовлетворяет системе из $n$ уравнений для вариационного принципа, выбранного для нахождения экстремума.

Системе (8) соответствует система сопряженных уравнений Гамильтона.

Все пошаговые разностные итерационные схемы динамического программирования для функционалов с кратными интегралами сохраняются. Их построение несколько осложняется введением производной (для двукратного интеграла) функции Беллмана в расчетную схему динамического программирования, но принципиально новых трудностей (кроме увеличения объема расчетов) не привносит. При этом численная реализация реализация пошаговой процедуры несколько изменяет смысл принципа оптимальности, поскольку в нашем случае неизбежно требуется учитывать некоторую локальную предисторию для численного определения производных от функции Беллмана, но «значение» этого изменения уменьшается при измельчении итерационных шагов.

Вариационные принципы имеют содержание только тогда, когда это содержание является физическим, т.е. отражает объективную реальность. Каков тогда смысл функционалов с кратными интегралами? Очевидный ответ состоит в констатации аналогии между уравнениями математической физики и уравнением для функции Беллмана – все они второго порядка. Следовательно, физические уравнения можно трактовать как уравнения Беллмана для соответствующих функционалов. Известен принцип Ле Шателье, согласно которому физические процессы протекают в направлении уменьшения влияния вызывающих их причин. Если этот принцип отождествить с устойчивым поведением функции Беллмана, то, следовательно, если уравнение для функции Беллмана непрерывно возмущать, т.е. рассматривать не замкнутую систему, а имеющую непрерывный приток энергии извне, то ситуация меняется, и процессы развиваются в противоположном направлении. Примеры: взрывные процессы; прямоточный реактивный двигатель – достаточно его разогнать во включенном состоянии, и далее разгон только усиливается; тело увеличивает длину в направлении прохождения через него потока энергии (света) – фототензорный эффект, проводник с током увеличивает длину.

Решение задач адаптивной идентификации возможно сведением к задачам стабилизации, но с той особенностью, что стабилизировать необходимо не искомые параметры (они наперед не известны по условию), а нулевые значения их производных, и при этом – одновременно с невязкой между опытной и модельной траекториями (далее – индексы «о» и «m»). Для этого достаточно построить функционал, содержащий соответствующие квадраты. Для полностью управляемой системы

$$\dot{X} = F(\alpha, t, X, u), \tag{9}$$

где $\alpha$ - вектор настраиваемых параметров, построим функцию невязки одним из следующих способов

$$e_1 = \dot{X}_o - F(\alpha, t, X_m, u); \quad e_1 = \dot{X}_m - F(\alpha, t, X_o, u),$$

где $\alpha$ - вектор настраиваемых параметров. Построим функционал

$$I = \int_0^\infty \int_0^\infty (e^T Pe + \dot{\alpha}^T G \dot{\alpha} + u^T Ru + \varphi(\dot{V}, V))(dt)^2, \tag{10}$$

где $V = V(\dot{\alpha}, e)$ - функция Беллмана, например – квадратичная форма расширенного вектора компонент невязки и производных вектора параметров. Оптимизируем уравнение настройки

$$\dot{\alpha} = -k \underset{\alpha}{grad} V, \tag{11}$$

где $k$ находится из условия обращения в тождество дифференциального уравнения для функции Ляпунова на траекториях поиска параметров. Записав систему уравнений Беллмана, найдем из нее оптимальное идентифицирующее управление. Оно обеспечивает минимально длительный и не колебательный процесс поиска решения. Недостатком такого способа решения задачи является исследовательский аспект, что затрудняет прямое использование процедуры на борту при летных испытаниях. Еще более затруднено построение алгоритмов, объединяющих задачи идентификации и управления.

Функционалы с кратными интегралами могут иметь разнообразную структуру. Например возможно в зависимости от задачи задавать сразу систему функционалов

$$I_1 = \int_0^\infty \omega_1(t, X, u)dt, \ldots I_i = \int_0^\infty \omega_i(t, X, u)dt \ldots, I_k = \int_0^\infty \omega_k(t, X, u)dt, \tag{12}$$

которой соответствует система уравнений Беллмана

$$\begin{aligned}
-\frac{\partial V_1(t,X)}{\partial t} &= \min_u \left\{ \omega_1(t,X,u) + \frac{\partial V_1(t,X)}{DX^T} F(t,X,u) + \varphi_1(t,X,V,u_1) \right\} \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
-\frac{\partial V_i(t,X)}{\partial t} &= \min_u \left\{ \omega_i(t,X,u) + \frac{\partial V_i(t,X)}{DX^T} F(t,X,u) + \varphi_i(t,X,V,u_1) \right\} \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
-\frac{\partial V_k(t,X)}{\partial t} &= \min_u \left\{ \omega_k(t,X,u) + \frac{\partial V_k(t,X)}{DX^T} F(t,X,u) + \varphi_k(t,X,V,u_1) \right\}.
\end{aligned} \tag{13}$$

Функционал можно задать с перемежающимися интегралами и подынтегральными функциями

$$I = \int_0^\infty \omega_1 \int_0^\infty \omega_2 \cdots \int_0^\infty \omega_n (dt)^n, \tag{14}$$

что соответствует интегродифференциальному уравнению для функции Беллмана, порядок интегрирования может быть дробным.

Построение можно начать с задания системы уравнений для векторной функции Беллмана

$$\dot{V}_1 = \omega_1 + d_{11}V_1 + d_{12}V_2 + e_1u_1; \qquad \dot{V}_2 = \omega_2 + d_{21}V_1 + d_{22}V_2 + e_2u_1, \tag{15}$$

где $u_1$ - управление более высокого иерархического уровня в сравнении с непосредственным управлением, входящим в уравнения объекта. Уровней такого рода иерархии может быть несколько. Построение оптимизирующей процедуры по этому способу соответствует иерархической нейронной системе управления, и отражает в некотором смысле процесс работы мозга человека. В самом деле, новая идея формируется мозгом с помощью «интерфейса», функции которого выполняет вся остальная часть человека. На первом этапе общественная потребность преобразуется в проблему, характерной особенностью которой

является «большая удаленность» исходных посылок и конечного результата, так что они с взаимных позиций «плохо видны». На втором этапе выстраиваются промежуточные нейронные связи в достаточном количестве, связывающие посылки и цель. Если промежуточные связи не могут быть выстроены из нескольких известных заготовок, то это означает, что исходная идея или неправильна, или соответствует новой ранее не известной закономерности в данной предметной области. Двухэтапности мышления соответствует устройство мозга из двух полушарий. Двухканальность структуры, соответствующей новой идее, является ее характерным признаком. Ситуация подобна также в некотором смысле методу сравнения, известному в автоматике. Системы такого рода естественно называть сложными, потому что наперед принципиально (за исключением «ясновидения») неизвестно их поведение. Мышление является свойством системы с высокой общественной организацией. Видимо, человек в действительности может думать о том, как он думает, и в этом нет парадокса. Векторным функционалом можно описать оператора в человекомашинной системе, реализующего несколько функций, компьютерную сеть, экономическую систему, целенаправленную кампанию. Интересен также класс задач структурной оптимизации, идея подхода к их решению состоит в применении функционалов с непрерывной кратностью интегралов. В этом случае оптимальное количество структурных иерархических уровней организации выступает в роли настроечного параметра. Примером может быть структура компьютера или их сети.

УДК 004.945

*В.М. Боровик, к.т.н. (Національний авіаційний університет, Україна)*

# АНАЛІЗ СИСТЕМ КЛІЄНТ-СЕРВЕР ЯК СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ (СМО)

*У роботі досліджується модель пріоритетного управління запитами у системах клієнт - сервер як управління системою масового обслуговування (СМО) із ситуаційним пріоритетами. Визначається оптимізаційна задача розрахунку пріоритетів для черг запитів.*

У цій роботі дається підхід побудови моделі прийняття рішення при обробці запитів клієнтів на сервері як системи масового обслуговування(СМО). При цьому виконується головне правило Кодда, при якому при розподілі бази даних дозволяється розширення засобів СУБД при логічній незалежності програм користувача від бази даних.

**Постановка задачі**

Нехай на сервер поступають запити різного типу, кількість типів яких – n. Усі запити поступають на сервер у деякі випадкові моменти часу $t_0 < t_1 < t_2 \ldots < t_{k\ldots} < \ldots$ Інтервал між їх появою $\tau_k = t_k - t_{k-1}$ є незалежним випадковим значенням з експоненціальним законом розподілу $F(t) = P\{\tau_k \le t\} = 1 - e^{-\lambda t}$, де $\frac{1}{\lambda}$,- середній час між моментами появи двох однотипних запитів. Далі ми будемо розрізняти типи запитів, а саме, $\lambda_i(\overline{1,n})$ - інтенсивність поступу запитів і-го типу. Таким чином на сервер поступають **n** пуассонівських вхідних потоків різнотипних запитів.

Усі запити, які поступають на сервер, можуть бути виконані на сервері, при чому час виконання буде випадковим значенням з щільністю ймовірності $\varphi(t) = \mu e^{-\mu t}$, де $\frac{1}{\mu}$ - середній час виконання залежить від типу запиту, тому $\mu_i(i = \overline{1,n})$ . Випадковий характер вказаних показників використовується при аналізі завантаження системи. Для баз даних виконання процедури обробки запитів залежить від об'єму інформації та складності алгоритму обробки, які задіяні у кожному випадку, тому одна і таж процедура може виконуватися різний час. Крім того, пуассонівський розподіл часу доступу і обробки запитів дає критичні по завантаженню параметри системи, що гарантує успішну роботу системи у реальному часі. Запити на обробку від клієнта до серверу поступають тільки у вигляді команд ініціалізації процедур, які разом з даними знаходяться на сервері. Якщо сервер вільний(може прийняти наш запит), запит приймається на виконання. В протилежному випадку ні, то він чекає на виконання свого часу у черзі.

Розглядається ситуація управління запитами, які очікують своєї обробки. Фізична інтерпретація черги має інформаційний характер і може пояснюватися по-різному. У нашому випадку деталі цього механізму не мають принципового значення. Як зазначалося на початку, протоколи обробки запитів постійно ускладнюються, а загальна тенденція – пошук оптимальних методів контролю роботи системи з урахуванням усіх можливих критеріїв. Наша задача - дати приклад рішення вибору запиту для обробки на сервері при альтернативних ситуаціях вибору.

У подальшому використовується апарат марковських процесів, який дозволяє у стаціонарних режимах роботи розробляти ясні у інтерпретації детерміновані алгоритми керування такими системами. Відомо, що випадковий процес є марковським, якщо для усіх фазових траєкторій ймовірність попадання системи у деякий наступний стан залежить тільки від того, в якому стані вона знаходиться у даний час і не залежить від попередньої історії. Будемо розглядати систему у моменти розмноження при попаданні у чергу пуассонівських вхідних потоків , маючих властивість відсутності післядії. На етапах "загибелі"(сидіння чи

перескоків), тобто етапів їх обслуговування, час якого розподілений по експоненціальному закону, одержуємо ланцюг, маючий марковську властивість. Для однорідного марковського ланцюга, тобто того, де відсутня залежність стану від часу, одержуємо для неприводимого випадку (кожний стан може бути досягнений із будь-якого іншого) можливість досягнення границі $\lim_{t\to\infty} P_{ik}(t) = \pi_k$, не залежного від початкового стану ланцюга, де $P_{ik}(t)$ – ймовірність попадання системи у стан "k", якщо до того вона перебувала у стані "i". Множина $\pi_k, (k = \overline{1, K})$ є граничний розподіл ймовірностей станів, називаємих далі стаціонарними ймовірностями станів. Ланцюг у такому вигляді є ергодичним.

У нашій моделі сервер інтерпретується як "прибор", запит - як "заява", виконання процедури (запиту) – обслуговування процедури, назва процедури – тип заяви, час виконання процедури – час виконання заяви.

$\vec{I} = (i_1, i_2, ..., i_s, ..., i_n)$ - кількість заяв по кожному s –му типу у черзі. У подальшому індексований параметр "i" буде визначати кількість заяв даного типу у черзі, а без індексу – просто номер заяви. При k=0 - прибор вільний, а при $\vec{I}\,|i_s = 0, (s = \overline{1, n})$ - у черзі відсутні заяви s-то типу. Вводиться обмеження на загальну довжину черги: $\sum_{s=1}^{n} i_s \le R$, де R-обмеження на загальну чергу та окремої черги по кожному типу:

Пояснимо динаміку переходів на граф-схемі (Рис.1), на якій зображена спрощена модель для одного прибору, двох типів потоків та обмеженні в черзі по одному місцю на кожний тип потоків $M_2|M_1|r_i (i = \overline{1,2})$.Кругами відображаються усі можливі стани процесу, а стрілками – можливі перехідні інтенсивності ( умовні та безумовні). Після цього для рівноважного випадку складаються рівняння усіх стаціонарних ймовірностей станів.

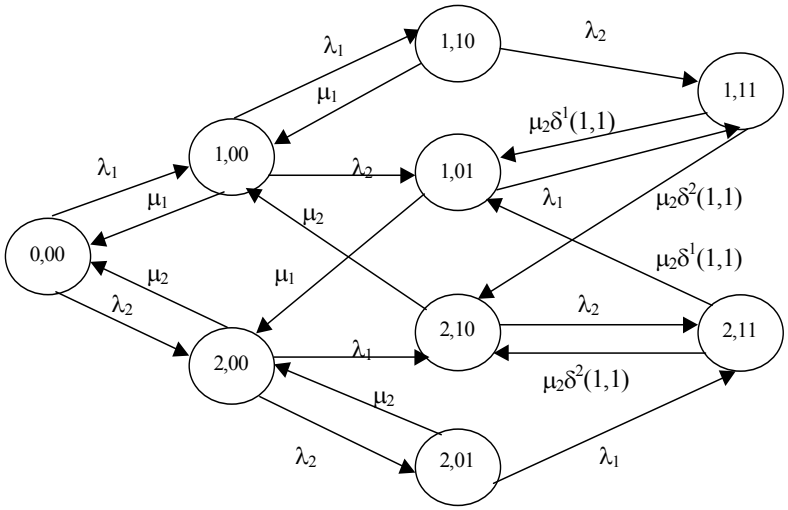



Рис.1

Рівняння для усіх $\pi(k, \vec{I})$:

1) $\pi(0,00)(\lambda_1+\lambda_2)= \pi(1,00)\mu_1+\pi(2,00)\mu_2$;
2) $\pi(1,00)(\lambda_1+\lambda_{2+}\mu_1)= \pi(0,00)\lambda_1+\pi(1,10)\mu_1+\pi(2,10)\mu_2$;
3) $\pi(2,00)(\lambda_1+\lambda_{2+}\mu_2)= \pi(0,00)\lambda_2+\pi(2,01)\mu_2+\pi(1,01)\mu_1$;
4) $\pi(1,10)(\lambda_{2+}\mu_1)= \pi(1,00)\lambda_1$;
5) $\pi(1,01)(\lambda_1+\mu_1)= \pi(1,00)\lambda_2+\pi(2,11)\mu_2\delta^1(11)+\pi(1,11)\mu_1\delta^1(11)$;
6) $\pi(2,10)(\lambda_2+\mu_2)= \pi(2,00)\lambda_1+\pi(2,11)\mu_2\delta^2(11)+\pi(1,11)\mu_1\delta^2(11)$;
7) $\pi(2,01)(\lambda_{1+}\mu_2)= \pi(2,00)\lambda_2$;
8) $\pi(1,11)[\ \mu_1\delta^1(11)+ \mu_1\delta^2(11)] = \pi(1,10)\lambda_2+\pi(1,01)\lambda_1$;
9) $\pi(2,11)[\ \mu_2\delta^1(11)+ \mu_2\delta^2(11)] = \pi(2,10)\lambda_2+\pi(2,01)\lambda_1$.

Пояснимо динаміку переходів вказаної схеми та рівнянь, визначивши альтернативні та неальтернативні ситуації, що відповідають умовним та безумовним інтенсивностям переходів.

При неальтернативних ситуаціях на етапах “розмноження” поступають пуассонівські вхідні потоки заяв, при тому виконуються обмеження на число місць у черзі. У момент закінчення обслуговування неальтернативна ситуація відповідає існуванню у черзі заяв тільки одного типу. Для цієї ситуації, яка відноситься до тривіального випадку моделей “розмноження та загибелі”, стан системи являє собою лінійний ланцюг. Закон вибору заяв на обслуговування у цьому випадку може бути вільним, що не змінює розподіл стаціонарних ймовірностей станів системи. Для визначеності будемо задавати, що для черги з заявами одного типу буде виконуватися дисципліна обслуговування FCFS – “перший прийшов - перший обслугований ”

При наданні інформації “прибор вільний” може з’явитися ситуація, коли у черзі знаходяться заяви більше одного типу. Для вирішення таких конфліктних ситуацій використовується пріоритетний параметр: $\delta^s(\vec{I}),(s=\overline{1,n})$, який визначає можливість вибору заяви s- го типу для обслуговування на приборі. Звичайно, що якась заява обов’язково буде вибрана, тому :

$$\sum_{s=1}^{n}\delta^s(i_1,i_2,\ldots,i_n)u(i_s)=1,$$

де $u(x)=\begin{cases}1, \text{якщо } x>0,\\ 0, \text{якщо } x\le 0.\end{cases}$

Тепер ми можемо у векторній формі записати систему рівнянь для моделі $M_n|M_1|r_i\,(i=\overline{1,n})$ чи R:

$$\pi(0,\vec{0})\sum_{s=1}^{n}\lambda_s=\sum_{s=1}^{n}\mu_s\pi(s,\vec{0}); \tag{1}$$

$$\pi(k,\vec{0})[\sum_{s=1}^{n}\lambda_s+\mu_k]=\pi(0,\vec{0})\lambda_k+\sum_{s=1}^{n}\mu_s\pi(s,\vec{0}\,|_{0_k=1}); \tag{2}$$

$$\begin{aligned}&\pi(k,\vec{i})[\sum_{s=1}^{n}\lambda_s u(\Omega^s)+\mu_k]=\sum_{s=1}^{n}u(i_s)\lambda_s\pi(k,\vec{i}\,|i_s=i_s+1)+\\ &u(\Omega^k)[u(\sum_{\substack{t=1\\t\neq k}}^{n}i_t)\delta^k(\vec{i}\,|i_k=i_k+1)+[1-u(\sum_{\substack{t=1\\t\neq 1}}^{n}i_t)]]\sum_{s=1}^{n}\mu_s\pi(s,\vec{i}\,|i_k=i_k+1);\end{aligned} \tag{3}$$

$$k=\overline{1,n};\quad \sum_{s=1}^{n}i_s>0;\ i_s=\overline{0,\Omega^s};\ s=\overline{1,n};$$

$$\begin{cases}(r_s-i_s),(s=\overline{1,n})\text{ - для роздільної черги;}\\ R-\sum_{s=1}^{n}i_s\text{ – для загальної черги.}\end{cases} \tag{4}$$

Нормуюча умова буде записана у такому вигляді:

$$\pi(0,\vec{0})+\sum_{k=1}^{n}\sum_{\vec{i}}\pi(k,\vec{i})=1 \tag{5}$$

В одержаній системі рівнянь $u(\Omega^s)$ задає обмеження на число місць у черзі.

Запис $\pi(k,\vec{i}\,|i_s=i_s-1)$ визначає перехід із стану $(k,i_1,i_2,\ldots,i_s,\ldots,i_n)$ у $(k,i_1,i_2,\ldots,i_{s-1},\ldots,i_n)$, а $\pi(k,\vec{i}\,|i_s=i_s+1)$ із стану $(k,i_1,i_2,\ldots,i_s,\ldots,i_n)$ у $(k,i_1,i_2,\ldots,i_{s+1},\ldots,i_n)$, що означає вихід заяви із черги чи її вхід.

**Критерій ефективності**

Розібравши механізм зміни стану системи, ми показали можливі переходи із одного стану у інший без урахування оцінки ефективності їх функціонування по тому чи іншому алгоритму. Для визначення оптимальності функціонування треба ввести критерії ефективності.

Одержані у результаті рішення задачі значення $\delta(\cdot)$ і будуть шукаємими параметрами управління.

У якості критерію виберемо мінімізацію часу перебування заяв у черзі (втрата від чекання). Для визначення цього критерію введемо показник витрат із-за перебування l-ї заяви s-го типу у черзі - $\beta_l^s$ . Тоді сумарні втрати у одиницю часу у системі від чекання будуть складати :

$$L = \sum_{s=1}^{n} \sum_{l=1}^{R} \beta_l^s \sum_{k=1}^{n} \sum_{\vec{i}} \pi(k, \vec{i} | i_s = l) \qquad (6)$$

Із опису рівнянь ми бачимо , що у критеріях ефективності існує тільки лінійна залежність від $\pi(\cdot)$, а нелінійна складові (множина $\pi(\cdot)$ на $\delta(\cdot)$) входять в обмеження в обмеження для усіх стаціонарних ймовірностей стану системи. Для вирішення цієї проблеми використовується стандартний прийом заміни існуючих нелінійний складові, що дозволить у подальшому використати методи лінійного програмування. Введення вказаних додаткових змінних потребує й нових обмежень з урахуванням конкретної моделі.

**Метод визначення оптимальних пріоритетів**

Головним математичним об'єктом досліджень даної роботи є СМО з кінцевим числом можливих станів у стаціонарному режимі. Процес керування такими системами розглядається, як пошук керуючих параметрів безупинного марковського ланцюга.

Рівняння для стаціонарних ймовірностей моделі (1)-(5). Та критерій ефективності у загальному вигляді - (6).

Із теорії кінцевих ланцюгів Маркова відомо, що усі стаціонарні ймовірності станів $\pi(\cdot)>0$, тобто більше нуля. Оптимальне значення керуючих елементів - $\delta(\cdot)$ могуть бути рівні тільки 0 чи 1. Таким чином , оптимізаційна задача зводиться до пошуку екстремуму функції:

$$L^* = f(\pi^*(\cdot)) = \max\{L'' = f(\pi(\cdot)) : Q(\pi(\cdot), \delta(\cdot)) = 0; \qquad (7)$$
$$0 < \pi(\cdot) \; [ \; 1; \; \delta(\cdot) \in \{0,1\}; \; \sum_{P} \pi(\cdot) = 1\},$$

де $\pi^*(\cdot)$ – шукаємі оптимальні стаціонарні ймовірності стану системи;
Q – характеризує функціональний зв'язок стаціонарних ймовірностей стану та керуємих пріоритетів $\delta(\cdot)$;
$L^*$ - оптимальне значення критерію ефективності;
P – множина усіх можливих стаціонарних ймовірностей стану, визначаємих типом та розмірністю моделі.

**Висновки**

Розглянута методологія може бути використана для побудови пріоритетного управління запитами у системах клієнт-сервер. Результати розрахунків представляються у вигляді таблиці чи бази даних ситуаційних пріоритетів, які попередньо розраховуються по параметрам системи.

УДК 004.043

*В.П. Гамаюн, д-р техн.наук,*
*В.В. Стариков*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ АЛГОРИТМОВ В МАКРООПЕРАТОРНУЮ ФОРМУ

*Предложен метод распараллеливания на основе логических связок между операциями и типов операций. Разработан программный аппарат анализа-преобразования в среде Java, позволяющий автоматизировать разработку макрооператорной формы алгоритма.*

Параллелизм в организации компьютерных компонент и систем остается альтернативным направлением развития. Структурно-операционный уровень организации систем и компьютеров строится по нескольким основным концепциям. При параллельной концепции функции обработки многократно повторяются аппаратурными средствами, которые организуются в различные ансамбли, группы, кластеры и т.д. При конвейерной концепции функции обработки разделяются на ряд подфункций, каждая из которых входит в некоторый конвейер.

Реализовано достаточное количество проектов с рассмотренной организацией вычислительного процесса и вычислительных структур. Исследованы и известны пиковые и реальные уровни производительности, достигаемые при параллельной и конвейерной организации.

Инвариантными причинами, препятствующими повышению уровней производительности при параллелизме, остаются зависимости по данным и зависимости по управлению в алгоритмических структурах (алгоритмах).Эффективность организации вычислительных систем связана со структурами алгоритмов. Главными в анализе алгоритмов считается отношение следования, определяющие типы логической организации систем. Такие отношения подобны классификации Флинна и описывают большинство существующих алгоритмов и организаций компьютерных средств. Алгоритмические структуры последовательного, последовательно-группового, слабосвязанного параллельного и параллельного общего вида исследуются на предмет «извлечения параллелизма» с целью увеличения количества одновременно выполняемых операций. Обнаружение параллелизма выполняется на различных уровнях – отдельных операторов, блоков операторов, блоков в программах, циклах и т.д. Однако полностью преодолеть указанные выше факторы, определяющие уровень параллелизма, не удается в известных исследованиях.

Один из факторов – зависимость по данным - при определенных условиях формирования алгоритмической структуры предлагается преодолеть при использовании многооперандных структур с соответствующей организацией. Многооперандная структура – это вычислительный узел, компонент операционной среды преобразующий больше 2-х операндов в одном операционном цикле. Примером может быть, например, 4-х входовой сумматор. Организация обработки на многооперандной структуре определяется соответствующей концепцией.

Концепция многооперандной обработки - структурно-организационный подход, заключающийся в объединении функций обработки в операционном узле , который преобразует многооперандный (небинарный )поток данных при соответствующем управлении.

В алгоритмической структуре, в соответствии с такой концепцией, следует определить операции, который возможно объединить в некоторый макрооператор (объединенную функцию), выполняемый в одном операционном цикле как составная команда (но не векторного типа). Для такого макрооператора определяется соответствующий поток данных, которые должны быть коммутированы одновременно в операционный узел. Объединение

предлагается выполнять по типа операций, так как на настоящий момент разработаны многооперандные узлы по такому же подходу. Разработан метод преобразования алгоритмов в макрооператорную форму. По графу алгоритма следует проанализировать все связи по данным и объединить в макрооператоры такие «соседние» операции, которые соответствуют типам многооперандных узлов.

Метод прямого и обратного анализа состоит в определении логически связанных операций по типу интегральных вычислений: из множества объектов преобразования (данных) определяется один результат.

Для реализации метода был разработан программный анализатор-преобразователь со следующей организацией (составом):

Программа разработана в среде разработки JAVA. Состоит из двух классов: CodeAnalizer – основной класс, в котором реализована основная часть программы, отвечающая за функциональность работы, графический интерфейс, основной алгоритм анализа и преобразования, и RangOperations – дополнительный класс, для работы с входящими данными и сохранением их и результатов.

Запуск программы осуществляется с помощью среды Java вызовом основного класса. В программе реализован графический интерфейс – для удобства и наглядности работы анализатора-преобразователя; также есть возможность задания параметров через командную стоку, при запуске программы; и дополнительные сведения (служебная информация, информация об ошибках, логирование работы программы) выводятся в консоль. Для запуска приложения необходима среда Java (jre) (см. Рис.1. Запуск приложения):

Command line: > java CodeAnalizer [InputParameter]

Входными данными для работы программы является исходный код исследуемого приложения написанного на языке высокого уровня C++(C). Данные в программу можно ввести через уже готовый сохраненный файл с кодом или через написания кода вручную в ходе работы программу (см. Рис.2. Введение кода вручную). На введенную информацию накладываются ограничения по разбору основных операторов приложения:

- Использовать один оператор в строке.
- Каждый оператор заканчивается ”;”

После обработки входных данных, в основном окне приложения отображается результат работы см. Рис.3. Вывод Результатов, в виде указания распознанных операторов и информация по ним.

После вывода результатов можно ввести данные снова, открыв новый файл с входящими данными или изменив, набранный вручную код.

Время анализа и преобразования программой, введенных данных, зависит от размера входящего файла для обработки и сложности исследуемого приложения.

Алгоритм программы построен на обнаружении и распознания введенных операторов в программе. В входном потоке производится поиск операторов с последующим разбором на операнды и операции в найденном операторе. По каждому найденному оператору ведется информация для последующего использования в новых найденных операторах. Используемые переменные и операции (с этими переменными) в операторах записываются со своими атрибутами для построения информации отдельно на каждый оператор, так и для следующих операций, в которых используются снова эти переменные. Для поиска операторов используются регулярные выражения, которые заданы на стандартные операторы языка высокого уровня C/C++. Поиск производится построчно, средствами среды разработки Java. При нахождении оператора, программа разбирает его на используемые переменные и входящие операции. Найденные операнды проверяет по уже обработанной информации по этой переменной, если она использовалась ранее. После проведенного анализа, в результате, по найденному оператору и операндам, создаются дополнительные записи, служебная информация – для выведения результатов работы в основном окне и последующим использованием для других операторов.

Графический интерфейс реализован средствами JFrame Java. После запуска программы отображается графическое окно, с выпадающими кнопками управления. С помощью кнопок управления (File->Open File, File-> Input Your Code, File->Exit) выполняются основные операции по работе с программой.

- File->Open File – предназначен для введения исходных данных через готовый файл. После нажатия появляется диалоговое окно в котором необходимо выбрать используемый файл для анализа и преобразования.
- File-> Input Your Code – для введения кода вручную. При выборе появляется новое окно для редактирования в котором можно вводить алгоритм, программу, операции с клавиатуры. В этом окне также содержатся управляющие кнопки, пункты меню:
    - Input->Load – после набора программного кода – для запуска программы на анализ и преобразование. Введенные данные будут переданы основной части программы на анализ. В основном окне будет выведен результат. Введенную информацию можно отредактировать, после чего снова ввести ее в программу на обработку.
    - Input->Clear – очистить рабочую область. Данные не сохраняются. Вся введенная информация стирается, для введения заново.
    - Input->Close – закрытые текущего окна для редактирования.
- File->Exit – выход из основного приложения. Все несохраненные данные удаляются.

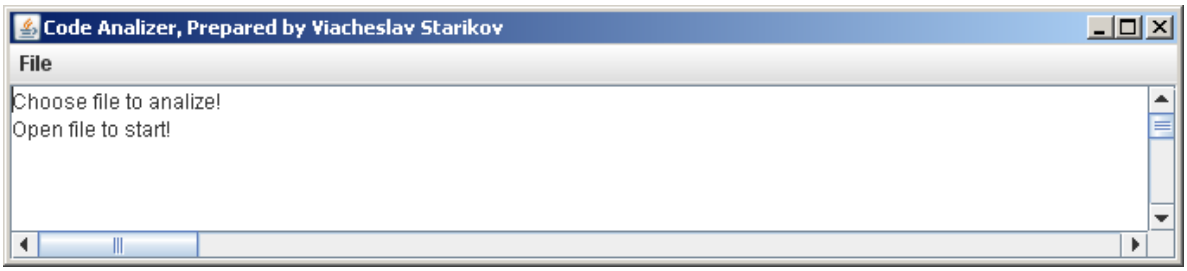



Рис.1. Запуск приложения

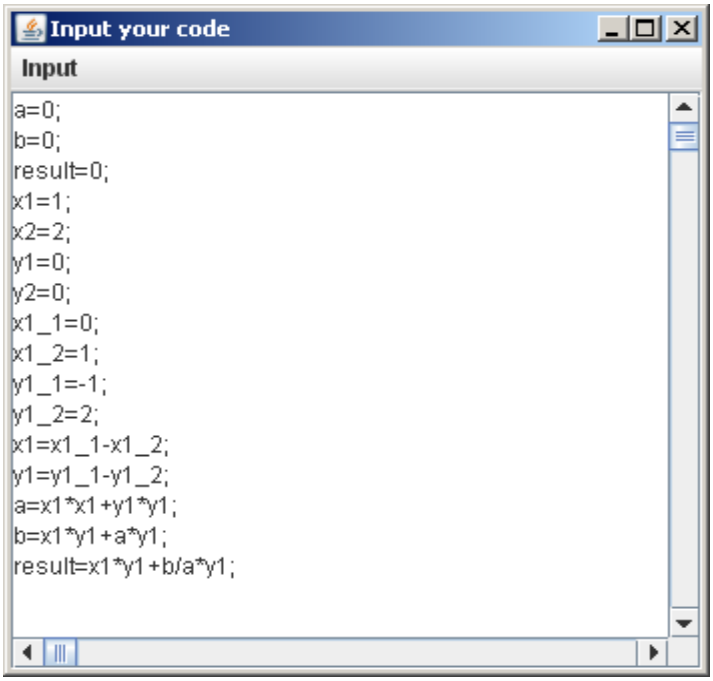



Рис.2. Введение кода вручную

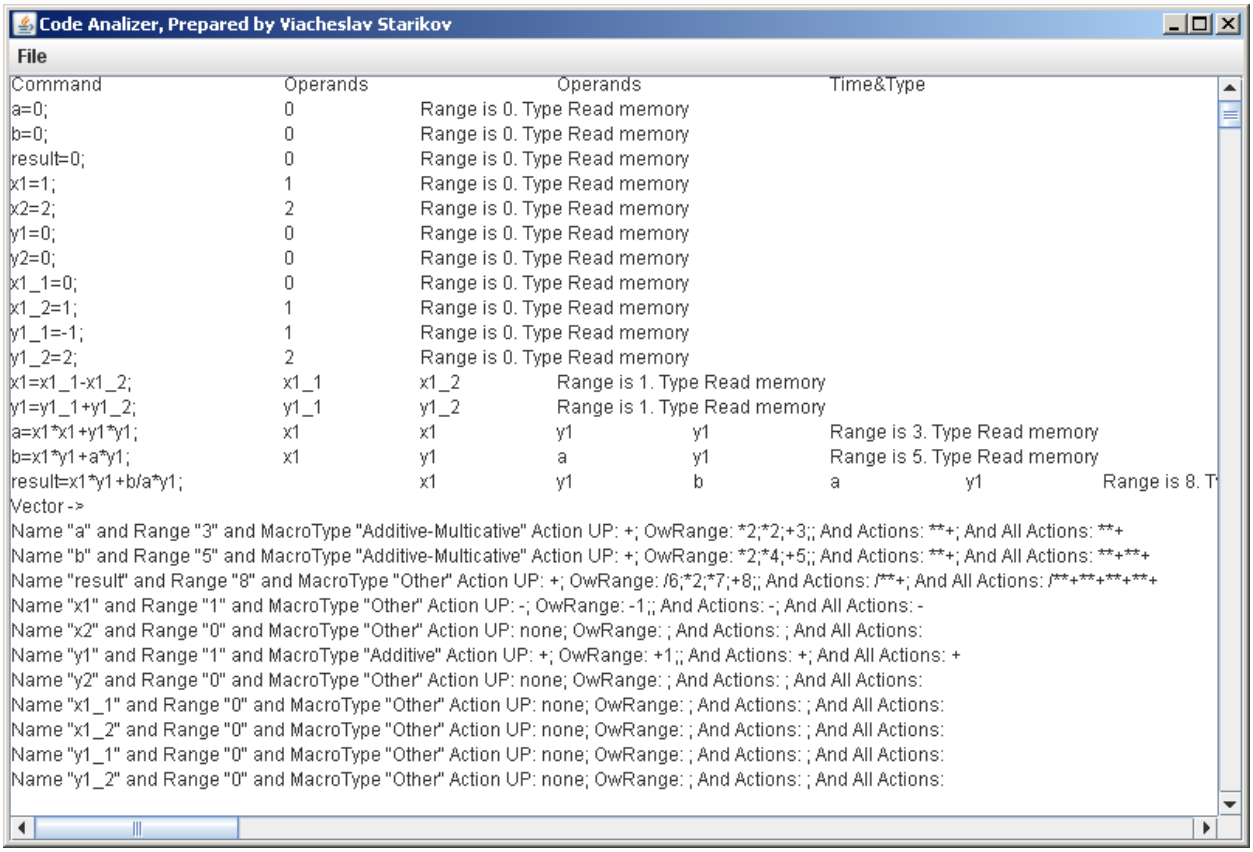



Рис.3. Вывод результатов

В результате работы программы получаем список операций по рангам, преобразуемые в каждой операции операнды, причем, если операнд является результатом предыдущей операции, то это также отражается в окне.

Список операций по рангам – является основой для распараллеливания, т.е. одновременно с преобразованием в макрооператорную форму получаем данные для формирования параллельного исполнения данного алгоритма.

Для формирование макрооператора получаем, также, полный список операций и данных, которые могут составить макрооператор по типам операций или их комбинаций.

## Выводы

Метод преобразования алгоритмической структуры в макрооператорную форму базируется на прямом и обратном анализе алгоритма по логическим связкам между смежными операциями. Метод определяет логически связанные ветви алгоритмов, которые могут реализовываться параллельно. Таким образом, достигается параллелизм для операций входящих в макрооператор, а также параллелизм между ветвями алгоритма.

Доказана возможность автоматизации анализа алгоритмической структуры, программа анализатор-преобразователь разработана в среде Java и ориентирована на представления преобразования алгоритмической структуры, представленной на языке высокого уровня (реализовано для C/C++).

УДК 004.043

*В.П. Гамаюн, д-р техн.наук*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ БОЛЬШОГО ДИАПАЗОНА

*Предложена технология обработки данных большого диапазона на основе разрядно-логарифмического кодирования. Технология реализуется на типовых компьютерных средствах как дополнительное математическое обеспечение, виртуальная система или спецпроцессор.*

Современные компьютерные информационные технологии являются совокупностью программно-аппаратных средств, которые оперируют данными и знаниями с целью получения конечного информационного продукта в виде нового знания или практического, реального решения задачи, которая была поставлена. Этапами построения современных информационных технологий могут быть следующие:

- выполнение системного анализа объекта автоматизации: детальное изучение предметной области (области, объекта автоматизации), которая раскладывается на отдельные по составу части (декомпозиция объекта);
- определение связей между составными частями;
- описание с помощью математических и информационных моделей составных частей объекта и объекта автоматизации в целом;
- разработка или выбор математических методов, с помощью которых будут разрешимые задачи в данной технологии;
- определение типов и количества баз данных (БД) и баз знаний (БЗ),которые будут применены в работе информационных технологий;
- определение компьютерной и телекоммуникационной базы;
- разработка системы защиты информации, разработка системы контроля и системы расширения и модификации;
- размещение технологии в компьютерной среде.

Основа научного фундамента теории и практики построения информационных технологий базируется на следующих направлениях:

- математическое и информационное моделирование процессов;
- методы оптимизации и теории системного анализа;
- теория и методы современного программирования;
- теория и методы защиты информации;
- теория вычислительных процессов и теория организации вычислительных структур;
- компьютерное и телекоммуникационное средства обработки и передачи данных.

В основе предлагаемой компьютерной технологии применяется разрядно-логарифмическая арифметика, являющаяся расширением двоичной арифметики [1,2]. Основным положением компьютерной разрядно-логарифмической арифметики является нетрадиционное представление данных - кодирование в двоичных данных только значащих, не равных нулю разрядов:

$$a_i \neq 0 \quad \Rightarrow \quad N_i = \log_2 a_i = \log_2 2^k = k .$$

Разрядная сетка компьютерной среды используется для хранения такого кода и, таким образом, двоичный операнд представим в виде массива двоичных кодов. Тип таких массивов для данных является одинаковым, тип «целый», или другими словами типы данных «целый», «с плавающей запятой», «естественной запятой» заменяются одним типом данных.

Диапазон данных при разрядно-логарифмическом кодировании увеличивается при структурной базовой разрядной сетки в N разрядов $2*(2^M/M)$ раз, где $M= 2^N -1$. Диапазон

данных при РЛ кодировании позволяет значительно уменьшить влияние округления, тип и структура данных исключают нормализацию, вычисление кодов значащих единиц как значений логарифмов определяет замену классического умножения –деления на сложение-вычитание.

Технология разрядно-логарифмической обработки базируется на обработке данных большого, «любого» диапазона данных. Правила представления данных соответствуют как позиционным, так и непозиционным системам счисления. Алгоритмы представления результатов или промежуточных данных позволяют оперировать с числами с увеличенной, нефиксированной разрядностью.

Точность вычислений-обработки допускает применение вычислительных методов или вычислительных алгоритмов, которые из-за накопления погрешностей не имели широкого распространения. Например, математический аппарат цепных дробей при реализации с РЛ арифметикой может быть использован как некоторая универсальная технология.

В остальном разрядно-логарифмическая обработка базируется на тех же принципах информационных технологий, которые упоминались выше.

Разрядно-логарифмическая арифметика является основой соответствующей организации вычислительного процесса и обработки различных структур данных в компьютерной среде.

Компьютерная технология на основе компьютерной арифметики с разрядно-логарифмическим представлением данных определяет расширение не только диапазона данных, но и экономию аппаратурной части, операционной структуры. По сравнению с традиционным объёмом аппаратуры, РЛ арифметика реализуема на структурах, объём которых в $\log_2 N$ раз меньше, N– разрядность исходной структуры.

Решение задач, чувствительных к ошибкам и погрешностям, обеспечение высокоточной обработки является одним из вариантов развитием нового направления, определенного как безошибочные вычисления.

При применении разрядно-логарифмической арифметики разрядность данных может быть задана априори с учетом предыдущих исследований или заданных условий. Другим вариантом является автоматическое изменение разрядности до достижения заданного критерия [1,2].

Известно, что определение обратной матрицы Гильберта при возрастании ранга матрицы для правильного решения требует увеличения разрядности.

Если обозначить количество значащих разрядов как Q, то при различных значения этого параметра Q получаем следующие значения главной диагонали матрицы произведения исходной и обратной матриц Гильберта (ранг матрицы 30):

| Q=30 | Q=60 | Q=80 |
|---|---|---|
| 9.999990684529532480e-01 | 1.000000000000000000e+00 | 1.000000000000000000e+00 |
| 9.999293926521204410e-01 | 1.000000000009832135e+00 | 1.000000000000000000e+00 |
| 1.001652818173170089 7e+00 | 1.000005916237076020 2e+00 | 9.999999625553925850e-01 |
| …… | …… | ……. |
| 3.280774140730500221 0e-01 | 9.788310140366434098 0e-01 | 1.000000146044504845 12e+00 |
| 7.695312500000000000e+00 | 1.003665957825432997 2e+00 | 1.000000130530129816 01e+00 |
| -8.735988140106201172 0e-01 | 1.020253854453443410 0e+00 | 1.000000000257018561 99e+00 |

| Q=100 | Q=120 |
|---|---|
| 1.000000000000000000e+00 | 1.000000000000000000e+00 |
| 1.000000000000000000e+00 | 1.000000000000000000e+00 |
| 1.000000000000632827e+00 | 1.000000000000000000e+00 |
| …… | …… |
| 9.999999999728494950e-01 | 1.000000000000000000e+00 |
| 9.999999999999977800e-01 | 1.000000000000000000e+00 |
| 9.999999999999078510e-01 | 1.000000000000000000e+00 |

Приемлемым решением являются такие значения обратной матрицы, при умножении которой на исходную получаем матрицу произведения с единичной диагональю. Из приведенных данных видно, что такое решение получается при значении количества значащих единиц Q близкое к 120.

Приведем результат вычисления функции $e^x$ через соответствующую цепную дробь с применением разрядно-логарифмического кодирования по представленной программе имеет два значения:

результат вычисления $e^x$ при x=1 с обычной арифметикой $e^x$ =2.71828;
результат вычисления $e^x$ при x=1 с разрядно-логарифмической арифметикой –
2.71828182846002164296805858612060546875 0.

Результат вычисления $e^x$ с РЛ арифметикой намного превышает по количеству значащих цифр результат вычислений с традиционной арифметикой и последовательность может быть продолжена в соответствии с заданными условиями.

Разрядно-логарифмическое кодирование является эффективным аппаратом моделирования вычислительных средств от вычислительного узла до вычислительных систем, т.е любых компонент вычислительно-операционной среды.

Реализация разрядно-логарифмической арифметики с применением объектно–ориентированного программирования (перегрузку операций) или структурно-аппаратурной поддержки определяет правила, организацию способы использования компьютерных средств. При широком использовании РЛ обработки нет необходимости изучать рассматриваемую арифметику, а достаточно решить следующую задачу: необходимо организовать применение РЛ арифметики таким способом, чтобы пользователь (программист) мог, не имея доступа к исходным кодам, использовать базовые операции РЛ арифметики точно также как с другими типами данных (целые, вещественные числа, текст, массивы). Для решения поставленной задачи в качестве основного языка программирования будем использовать С++.

Для начала необходимо создать новый тип, который будет работать с РЛ числами. В С++ это возможно реализовать с использованием классов. Например:

```
Class RL
{
private: int Masiv = new [200]int; int Q;
public:
int Dlina(void);
}
```

Данный класс имеет два внутренних параметра (к которым напрямую получить доступ нельзя), определенные в разделе private, и один метод Dlina, в разделе public, возвращающий длину РЛ операнда. Таким образом можно добавить множество методов для осуществления определенных действий с РЛ операндов.

Для создания РЛ переменной достаточно записать следующее - RL A; при этом мы объявляем РЛ число точно также, как это делается для базовых типов данных в С++. Далее нужно создать операции, необходимые для выполнения арифметических и логических действий над РЛ операндами. При этом нужно, чтобы пользователь мог работать с ними, точно так же как и с другими типами данных. Другими словами все основные операции производились с помощью соответствующих знаков ( + ,-,*,/,=,<,> и т.д.):

C=A+B;

C=F/D.

Такую возможность позволяет реализовать перегрузка операций в С++. Это выглядит следующим способом. Создается специальная функция, которая вместо стандартной записи Plus(A,B) , позволяет использовать запись A+B. Эта функция в нашем примере записывается так: RL operator +(RL B). Аналогичным способом записывается все необходимые операции, как арифметические так и логические (сравнения) .

Таким образом, решается проблема программирования с новым типом данных. При этом пользователь не вникает в особенности РЛ арифметики и работает с ней точно также как и другими типами данных.

При этом, при необходимости, исходные коды являются открытыми для пользователя, так как такой класс размещается или непосредственно в рабочем файле или в заголовочном файле. Для закрытия исходных кодом можно так организовать класс, чтобы он был легко доступен, и в то же время нельзя было бы просмотреть исходный код класса.

Применение разрядно-логарифмической технологии ориентировано, прежде всего, на вычислительные задачи и для пользователя такая технология представима как информационная технология, высокоточная вычислительная система или мультипроцессор. На современном этапе развития компьютерных средств такая технология может быть распространена в виде средств типа MatLab, специального программного обеспечения для любого компьютера. Как арифметический сопроцессор в высокопроизводительных системах реального времени технология может быть реализована через специальные структуры. Система с предлагаемой технологией может быть частью сетевой структуры (например GRID) и использоваться пользователями как виртуальная система.

## Выводы

Компьютерная арифметика на основе расширения двоичной арифметики как новое представление данных в компьютерной среде – разрядно-логарифмическое кодирование- определяет новую технологию обработки данных. Характеристиками такой обработки является высокая точность, единственный тип данных, совместимость с разработанными языками высокого уровня.

## Список литературы

1. *Гамаюн В.П.* Разрядно-логарифмическая арифметика. Методы и алгоритмы. – К.: Книжное издательство НАУ, 2007.-272 с.

2. *Гамаюн В.П.* Моделювання багаторозрядних комп’ютерних систем: Навч. посібник. – К.: Книжкове вид-во НАУ, 2007. – 112 с.

УДК 62.50

*О.М. Глазок, к.т.н. (Національний авіаційний університет, Україна)*

# МЕТОД РОЗВ'ЯЗАННЯ СИСТЕМ ЛІНІЙНИХ АЛГЕБРАЇЧНИХ РІВНЯНЬ ЗА ДРУГИМ МЕТОДОМ ЛЯПУНОВА

*Запропоновано метод чисельного розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь з використанням допоміжної функції, значення якої є мірою нев'язки отриманого наближеного розв'язку. Для введеної допоміжної функції задається диференційне рівняння, що визначає її поведінку в процесі розв'язку.*

Багато задач математичної фізики зводяться до чисельного розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Часто задачі математичного моделювання найрізноманітніших процесів із застосуванням ЕОМ, а також чимало чисельних методів вирішення різних (особливо нелінійних) задач включають в себе розв'язання систем лінійних рівнянь як елементарний крок відповідного алгоритму. Теорія отримання точних та наближених розв'язків систем лінійних алгебраїчних рівнянь є досить старою і дослідженою галуззю обчислювальної математики. Існує обширна література, присвячена методам прикладної лінійної алгебри, а програмні продукти, що реалізують найбільш популярні алгоритми обчислювальної лінійної алгебри, стали невід'ємною частиною прикладного програмного забезпечення, зокрема, сучасних математичних пакетів [1, 2].

Однак алгоритми, реалізовані в такому програмному забезпеченні, як правило, відносяться до класу алгоритмів прямого розв'язання задачі, і орієнтовані на розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь невеликих чи середніх розмірів (до кількох сотень чи тисяч рівнянь), в той час як сучасні прикладні задачі в результаті апроксимації неперервного функційного рівняння кінцево-різницевою задачею нерідко породжують системи, у яких кількість рівнянь може складати сотні тисяч чи навіть мільони, і потреби практики в розв'язанні задач все більшої розмірності зростають. Джерелом таких обчислювальних задач є математичні моделі різноманітних систем з розподіленими параметрами (задачі механіки суцільних середовищ, гідродинаміки, аеродинаміки, міцності та опору матеріалів), а також математичні моделі технічних пристроїв, що складаються з великого числа елементів, сполучених локальними зв'язками – наприклад, задачі розрахунку складних будівельних конструкцій і великих електричних кіл. Математичні моделі, що записуються як системи лінійних алгебраїчних рівнянь великої розмірності, зустрічаються також в математичній економіці, біології та інших галузях науки.

Сучасний бурхливий розвиток і розповсюдження обчислювальної техніки надає в розпорядження дослідника обчислювальні потужності, що дозволяють розв'язувати задачі великих розмірностей; в той же час в математичному забезпеченні спостерігається ряд проблем, що мотивує дослідників пропонувати нові методи розв'язання таких задач [3, 4]. Серед труднощів практичного розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь великої розмірності найперше слід відзначити обмеженість оперативної пам'яті ЕОМ та значну тривалість розрахунків. Розмірність задач, а відтак і обсяг даних, що необхідно зберігати та обробити при їх розв'язанні, зростають швидше, ніж обсяг оперативної пам'яті доступних обчислювальних машин, і швидше, ніж їх швидкісні характеристики. В значній мірі обмеження на розмірність систем можна б було зняти, якщо використовувати для зберігання елементів матриці зовнішні запам'ятовуючі пристрої. Однак в цьому випадку в багато разів зростають як витрати машинного часу, так і складність відповідних алгоритмів.

Деякою мірою гостроту цієї проблеми пом'якшує той факт, що в системах з великою кількістю елементів зв'язки між елементами найчастіше є локальними, і, відповідно, матриці систем лінійних алгебраїчних рівнянь, що описують такі системи, найчастіше є розрідженими. Тому є можливість за рахунок раціональної організації обчислювального процесу добитися значного зменшення потреб у оперативній пам'яті для зберігання даних,

оскільки немає потреби зберігати в пам'яті нульові елементи (яких у розрідженій матриці переважна більшість), а також зменшення тривалості обчислень – завдяки тому, що немає потреби виконувати над нульовими елементами арифметичні дії, результат яких заздалегідь відомий.

Оцінимо виграш, отриманий від відкидання нульових елементів для $m$-діагональної матриці розмірності $N$ (так, наприклад, для класичної різницевої схеми, що наближує диференційне рівняння другого порядку щодо функції однієї координати, $m$=3, а $N$ відповідає кількості вузлів сітки.) У головній діагоналі матриці (що містить ненульові елементи) міститься $N$ елементів, а інші ($m$–1) діагоналей з ненульовими елементами містять на один чи декілька елементів менше. Оцінимо кількість елементів в цих діагоналях зверху також величиною $N$ . Таким чином, всього у матриці є менше ніж $m \times N$ елементів, що не є завідомо нульовими. А відносний вміст ненульових елементів менший, ніж $\frac{mN}{N^2} = \frac{m}{N}$. Решта елементів – більше ніж $N(N–m)$ елементів – нульові, а відносний вміст нульових елементів більший, ніж $\frac{N-m}{N^2}$. Величина $m$ відповідає кількості зв'язків одного елемента і в більшості задач, де зв'язки між елементами локальні, є невеликим числом. А розмірність задачі $N$ може сягати сотень тисяч і мільонів, отже, видно, що раціоналізація обчислень приносить значну економію. До цього слід додати, що, якщо в задачі задано крайові значення, то і в «ненульових» діагоналях частина елементів можуть виявитись нульовими, оскільки крайові значення враховуються у постійному векторі правих частин.

Наступним кроком до зменшення апаратних вимог є застосування ітераційних методів розв'язання замість прямих. Ітераційні методи застосовують головним чином для розв'язання задач великої розмірності, коли використання прямих методів неможливе через названі вище обмеження. Не вдається до таких задач застосувати і методи з виключенням, оскільки при їх використанні велике число нульових елементів перетворюється на ненульові і матриця втрачає властивість розрідженості. При використанні ж ітераційних методів в ході ітераційного процесу матриця не міняється, і вона, природно, залишається розрідженою. Велика ефективність ітераційних методів в порівнянні з прямими методами тісно пов'язана з можливістю істотного використання розрідженості матриць. Можна зробити висновок, що актуальним є пошук нових ітераційних методів розв'язання названих задач, орієнтованих на роботу з системами рівнянь великої розмірності. Перспективним напрямком такого пошуку виглядає застосування методу функцій Ляпунова. Теорія першого та другого методів Ляпунова продовжує активно розвиватися, зокрема в застосуваннях до розв'язання задач, в яких описується чи визначається поведінка систем з розподіленими параметрами [5, 6].

Метою даної статті є застосування для розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь ітераційного методу, заснованого на методі функцій Ляпунова. Поставимо за мету визначити допоміжну функцію, значення якої є мірою нев'язки отриманого наближеного розв'язку, і для введеної допоміжної функції задати диференційне рівняння, що визначає бажану поведінку допоміжної функції в процесі розв'язку.

Розглянемо задачу пошуку розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь, записаної у векторно-матричній формі як

$$AX=B, \tag{1}$$

де $A$ – задана постійна матриця, $B$ – заданий постійний вектор правих частин рівнянь, $X$ – вектор розв'язків, який необхідно знайти.

Визначимо скалярну допоміжну функцію

$$V(X) = (AX–B)^T Q(AX–B)= X^T A^T QAX – X^T A^T QB – B^T QAX + B^T QB, \tag{2}$$

де $Q$ – вагова матриця, $Q=Q^T$ . Якщо $X=X_i$ (наближений вектор розв'язків, знайдений на $i$-й ітерації), то $AX–B$ – це вектор нев'язки знайденого розв'язку системи рівнянь (1), а значення

функції $V(X)$ можна розглядати як квадратичну норму вектора нев'язки, знайдену з ваговою матрицею $Q$.

Розглянемо вектор $X$ як вектор-функцію часу $X(t)$, маючи на увазі мету організувати ітераційний процес так, щоб значення сходилися до точного розв'язку системи (1). Тоді і функція $V(X)$ змінюється в часі. Нехай закон загасания допоміжної функції (2) в часі задано рівнянням

$$\dot{V} + cV = 0\,, \tag{3}$$

де $c$ – деяка постійна величина, значення якої можемо обрати довільно, таким чином визначаючи швидкість спадання норми нев'язки.

Залежність $V(X)$ (2) визначає скалярну функцію $V$ багатовимірного вектора $X$, тому рівняння (3) не визначає вектор-функцію $X(t)$ однозначно, а лише задає один зв'язок між координатами вектора $X$. З метою визначення однозначного розв'язку системи (1) використаємо в якості додаткового зв'язку наступний закон руху $X$, виконання якого ми також будемо вимагати:

$$\dot{X} = -k\frac{\partial V}{\partial X}\,, \tag{4}$$

де $k$ – деяка (не довільна) величина, яку буде визначено нижче.

Використовуючи визначення (2), а також властивості $\frac{\partial}{\partial X}\left(X^T C\right) = C$, $\frac{\partial}{\partial X}(SX) = S^T$, знайдемо похідну допоміжної функції по вектору $X$:

$$\frac{\partial V}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X}\left(X^T A^T QAX\right) - \frac{\partial}{\partial X}\left(X^T A^T QB\right) - \frac{\partial}{\partial X}\left(B^T QAX\right) + 0 =$$

$$= \frac{\partial}{\partial X}\left(X^T\left[A^T QAX\right]\right) + \frac{\partial}{\partial X}\left(\left[X^T A^T QA\right]X\right) - \frac{\partial}{\partial X}\left(X^T\left[A^T QB\right]\right) - \frac{\partial}{\partial X}\left(\left[B^T QA\right]X\right) =$$

$$= A^T QAX + \left[X^T A^T QA\right]^T - A^T QB - \left[B^T QA\right]^T =$$

$$= A^T QAX + A^T QAX - A^T QB - A^T QB = 2A^T Q\left(AX - B\right). \tag{5}$$

$$\frac{\partial V}{\partial X^T} = \left[\frac{\partial V}{\partial X}\right]^T = \left[2A^T Q\left(AX - B\right)\right]^T = 2\left(AX - B\right)^T QA\,. \tag{6}$$

Зокрема, в скалярному випадку (одновимірний вектор $X$) співвідношення (2) та (5) набудуть вигляду:

$$v(x) = (ax - b)q(ax - b) = q(ax - b)^2\,;$$

$$\frac{\partial v(x)}{\partial x} = 2qa(ax - b)\,.$$

Підставимо до рівняння (3) похідну $\dot{V}$, знайдену в силу $X$, при цьому використаємо співвідношення (6) і (4):

$$\dot{V}\Big|_{\dot{X}} + cV = \left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)^T \dot{X} + cV = \left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)^T\left(-k\frac{\partial V}{\partial X}\right) + cV = 0\,.$$

Тепер можна визначити значення $k$, при якому є сумісними рівняння (3) і (4):

$$k\left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)^T\left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)=cV \quad ; \quad k=\frac{cV}{\left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)^T\left(\frac{\partial V}{\partial X}\right)} \quad ;$$

$$k=\frac{c(AX\text{-}B)^TQ(AX\text{-}B)}{\left(2A^TQ(AX-B)\right)^T\left(2A^TQ(AX-B)\right)}=\frac{c(AX\text{-}B)^TQ(AX\text{-}B)}{4(AX-B)^TQAA^TQ(AX-B)}=k(X).$$

Як бачимо, вимога сумісності рівнянь (1)–(4) призвела до того, що величина $k$ виявилася функцією вектора стану.

Тепер перейдемо безпосередньо до пошуку розв'язку системи рівнянь (1). Оскільки нашою метою є побудувати вектор-функцію , яка сходиться до точного розв'язку, то для знаходження цього розв'язку необхідно інтегрувати рівняння (4), у якому похідна $\frac{\partial V}{\partial X}$ задана співвідношенням (5).

$$\dot{X}=-k\frac{\partial V}{\partial X}=-\frac{c}{4}\cdot\frac{(AX\text{-}B)^TQ(AX\text{-}B)}{(AX-B)^TQAA^TQ(AX-B)}\cdot 2A^TQ(AX-B);$$

$$\dot{X}=-k\frac{\partial V}{\partial X}=-\frac{c}{2}\cdot\frac{(AX\text{-}B)^TQ(AX\text{-}B)}{(AX-B)^TQAA^TQ(AX-B)}\cdot A^TQ(AX-B). \qquad (7)$$

Можна зробити висновок, що мети побудови досягнуто: співвідношення (7) є диференційним рівнянням щодо вектор-функції $X$, яке не містить інших невідомих величин, і його легко розв'язати шляхом чисельного інтегрування на ЕОМ за одним з відомих методів, обравши деяке початкове наближення вектора $X$. Величина $c$, на яку не було накладено ніяких обмежень, може бути обрана довільно і визначатиме швидкість наближення послідовності отриманих значень до точного розв'язку.

Напрямки подальших досліджень наступні: вивчити умови збіжності алгоритму (7); вивчити можливості забезпечення чи пришвидшення збіжності за рахунок маніпулювання в ході пошуку розв'язку величиною $c$ (константою загасання в рівнянні (3)) та ваговою матрицею $Q$; з'ясувати, чи можливе застосування інших форм умов (3) і (4) і як це відіб'ється на вигляді розв'язку; розробити раціональні з погляду обсягу обчислень методи чисельного інтегрування диференційного рівняння (7); з'ясувати питання обумовленості методу та можливий вплив похибок чисельного розв'язання на точність результату; порівняти обчислювальну ефективність запропонованого методу та існуючих.

## Список літератури


1. *Петров И.Б., Лобанов А.И.* Лекции по вычислительной математике. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. — 523 с.

2. *Форсайт М.* Численное решение систем линейных алгебраических уравнений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1969. – 167 с.

3. *Джордж А., Лю Дж.* Численное решение больших разреженных систем уравнений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 333 с.

4. *Ерёмин М.А.* Определитель Ерёмина в линейной и нелинейной алгебре. Линейное и нелинейное программирование. М: КомКнига, 2006. 120 стр.

5. *Шестаков А.А.* Обобщенный прямой метод Ляпунова для систем с распределенными параметрами. - М.: КомКнига, 2007. - 320 с.

6. *Анашкин О.В.* Развитие второго метода Ляпунова в теории устойчивости дифферен-циальных и функционально-дифференциальных уравнений: Дис... д-ра физ.-мат. наук. – Симф., 2002. — 307с.

УДК: 681:51

*Н.М. Глазунов, доктор физико-математических наук*
*(Национальний авиационный университет, Украина)*

# ТЕОРЕТИКО-КАТЕГОРНЫЙ МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОНТОЛОГИЙ ФОРМАЛЬНОЙ ТЕОРИИ

*Предлагается метод проектирования онтологий формальной теории, основанный на теории категорий и методах гомологической алгебры. Метод иллюстрируется на примере проектирования избранных онтологий предметной области «Теория формальных схем и групп». Кратко рассматриваются теоретические основы метода.*

**Введение**. Понятие онтологии (сетевой онтологии) возникло в конце прошлого века в связи с работами по интеллектуализации Интернета и разработке семантического Веба. Схематически онтология есть тройка (концепты, отношения, правила вывода). Онтологии могут быть представлены графами. Однако проектирование достаточно полной онтологии предметной области, а именно такие онтологии и нужны для семантического Веба, представляет собой очень сложную задачу, решение которой включает поиск и отбор концептов, отношений, связей, построение RDF-графов, последующую верификацию этих объектов, в том числе исследование на полноту [1-2]. С использованием терминологии баз данных и знаний проектирование базы данных/знаний может вестись сверху вниз, начиная с концептуальной (или инфологической) модели, которые отображают полноту модели, через внешние модели и заканчивая внутренней моделью [3]. В предлагаемом нами подходе параллельно строятся внешние модели, которые в нашем случае представляются концептами со связями и операциями между ними, то есть онтологиями, и концептуальная модель, представляемая на языке теории категорий. Таким образом, развиваемый нами подход состоит в построении концептуальной теоретико-категорной модели предметной области ((ПО), что подразумевает рассмотрение ПО как формальной теории, и последующем преобразовании, с использованием аппарата теории категорий, колчанов и гомологической алгебры, объектов и подкатегорий модели ПО в онтологии с сохранением полноты описания. В качестве предметной области нами выбрана теория формальных схем и групп. Эта теория является обобщением теории групп и алгебр Ли, которая строится над комплексным и вещественным полями и находит широкие и глубокие приложения в науке и технике, на кольца, и, в частности, на поля конечной характеристики.

**Концепты формальной теории и их отношения.** Ниже представлен связанный набор концептов избранной нами ПО с указанием связей между некоторыми из них. Он построен в результате лексического и математического анализа предметной области «Теория формальных схем и групп» на состояние ПО к 2008 году. Весь список концептов и ключевых слов теории содержит более трехсот связанных терминов. Мы используем следующие обозначения: в – отношение старшинства (вышестоящий концепт), н – отношение подчиненности (нижестоящий концепт), см – отображение ключевого слова в концепт, а – ассоциативное отношение, с – отношение синонимии. Концепты набраны прописными буквами. Ключевые слова набраны строчными буквами, гнездовые понятия (концепты) выделенными (bold) прописными буквами:

**СХЕМА ФОРМАЛЬНАЯ**
в - СХЕМА
н - ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ
СХЕМА АРТИНОВА
СХЕМА ФОРМАЛЬНАЯ ЛОКАЛЬНАЯ
СХЕМА ЭТАЛЬНАЯ

**Схема формальная групповая**
см ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ

**СХЕМА ФОРМАЛЬНАЯ ЛОКАЛЬНАЯ**
в - СХЕМА
СХЕМА ФОРМАЛЬНАЯ

**СХЕМА ГРУППОВАЯ**
в - СХЕМА
н - ГРУПА ФОРМАЛЬНАЯ
а - ГРУППА АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ

**СХЕМА АРТИНОВАЯ**
в - СХЕМА АФФИННАЯ
н - СХЕМА АРТИНОВА
а - АЛГЕБРАИЧЕСКОЕ МНОГООБРАЗИЕ

**СХЕМА ГРУППОВАЯ КОНЕЧНАЯ**
в - СХЕМА
а - ГРУППА КОНЕЧНАЯ

**Схема формальная групповая**
см ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ

**СХЕМА ФОРМАЛЬНАЯ ЛОКАЛЬНАЯ**
в - СХЕМА
СХЕМА ФОРМАЛЬНАЯ

**ГРУППА КОММУТАТИВНАЯ n-МЕРНАЯ**
в - ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ КОММУТАТИВНАЯ

**ГРУППА КОММУТАТИВНАЯ ОДНОМЕРНАЯ**
в - ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ КОММУТАТИВНАЯ

**группа локальная**
см ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ

**ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ**
с - группа аналитическая
группа локальная
групповая схема формальная
в - ГРУППА
н - ГРУППА ВИТТА
ГРУППОВОЙ ЗАКОН
ГРУППОВОЙ ЗАКОН КОММУТАТИВНЫЙ
ГРУППА КОММУТАТИВНАЯ - МЕРНАЯ
ГРУППА КОММУТАТИВНАЯ ОДНОМЕРНАЯ
ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ КОММУТАТИВНАЯ

**группа формальная абелева**
см ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ КОММУТАТИВНАЯ

**ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ КОММУТАТИВНАЯ**

с - группа формальная абелева
в - ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ
н - ГРУППОВОЙ ЗАКОН КОММУТАТИВНЫЙ
ГРУППА КОММУТАТИВНАЯ - МЕРНАЯ
ГРУППА КОММУТАТИВНАЯ ОДНОМЕРНАЯ

**ГРУППА С ОПЕРАТОРАМИ**

в - АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ СИСТЕМА
а - ГРУППА
МОДУЛЬ НАД КОЛЬЦОМ А

**ГРУППОВОЙ ЗАКОН**

в - ОТОБРАЖЕНИЕ
н - ФОРМАЛЬНЫЙ ГРУППОВОЙ ЗАКОН
а - ГРУППОВОЙ ЗАКОН КОММУТАТИВНЫЙ

**ГРУППОВОЙ ЗАКОН ФОРМАЛЬНЫЙ**

в - ГРУППОВОЙ ЗАКОН
а - ГРУППОВОЙ ЗАКОН КОММУТАТИВНЫЙ

Мы не будем приводить здесь теоретико-графовое представление концептов и их связей, а сразу перейдем к категорификации онтологий. Теоретико-графовое представление кратко рассмотрено в [4-5].

**Теоретико-категорная модель.** Пусть граф онтологии является конечным, направленным и связным (возможно с петлями и кратными ребрами). Будем называть онтологию, имеющую конечный, направленный и связный (возможно с петлями и кратными ребрами) граф, категорифицируемой. Напомним, что такие графы называют колчанами [6]. Во многих случаях такие графы являются направленными деревьями. Более общо, будем понимать под категорификацией теоретико-категорное представление мира, который мы отображаем. Имеется несколько уровней алгебраизации и категорификации онтологий. Два из них связаны с представлением колчанов и с использованием маркированных колчанов. Пусть Q есть колчан без ориентированных циклов с множеством вершин V = {1,..,n} и множеством дуг E. Пусть k есть поле. Пусть i, j$\in$ V, a $\in$E. Представлением колчана Q называют семейство M = ((M(i)), M(a)), где M(i) есть k – векторное пространство и для каждой стрелки a: i $\rightarrow$ j в Q, M(a): M(i) $\rightarrow$ M(j) есть k –линейное преобразование. Морфизмы между представлениями определяются обычным способом [6]. Эта конструкция Ройтера-Габриэля [6] определяет категорию представлений repk(Q).

Для данного колчана Q его категория путей PathQ имеет в качестве объектов вершины Q и в качестве морфизмов i $\rightarrow$ j пути из i в j, которые по определению есть формальные комбинации a1, … ,an , где an исходит из i , a1 оканчивается в j, и конечная точка ai+1 совпадает с начальной точкой для ai для всех i = 1,… , n-1. Категория PathQ расширяется до линейной категории PathLQ с тем же классом объектов и с морфизмами Mor(i, j) = {множество всех путей из i в j и всех их линейных комбинаций с коэффициентами из k}. Эквивалентным определением представления колчана есть аддитивный функтор из PathLQ в категорию k – модулей of k-mod.

**Теоретико-категорное представление концептов**. Рассмотрим концепт ФОРМАЛЬНАЯ СХЕМА. Имеется несколько категорных определений формальной схемы. Напомним здесь три определения. Одно связано с веденными А. Гротендиком допустимыми кольцами и их спектрами. Второе развивает идею формального функтора А. Гротендика, а третье определяет формальные схемы как индуктивные пределы артиновых схем. Таким

образом, в каждом из трех названных случаев категорным представлением концепта ФОРМАЛЬНАЯ СХЕМА выступает категорная конструкция, в первом случае топологическая категория, во втором случае формальный функтор, а в третьем случае – функтор индуктивного предела артиновых схем. Применяя правила преобразования и редукции в этих категориях, можно доказать эквивалентность этих категорных определений концепта ФОРМАЛЬНАЯ СХЕМА. Следующий основной концепт - ГРУППА ФОРМАЛЬНАЯ**.** Её теоретико-категорное определение – групповой объект в теории формальных схем. Формальная групповая структура может быть определена на каждой из трех конструкций формальной схемы. Теоретически достаточно ввести определение на каком-нибудь одном объекте, а затем преобразованиями (функторными) распространить его на остальные два. Имеется, и автором это проверено, категорное описание каждого из вышеприведенного списка концептов. Более того, используя категорные понятия формальных группоида и стэка [7], можно значительно упростить категорное описание формальных групп и их онтологий. Некоторые приложения развиваемого нами подхода к другим предметным областям намечены в [8]

## Выводы

Опыт применения теоретико-категорного метода для проектирования онтологий формальной теории на примере онтологий предметной области «Теория формальных схем и групп» свидетельствует о перспективности метода для проектирования онтологических баз знаний и необходимости проведения дальнейших исследований.

## Список литературы


1. *Ganter B., Stumme G., Wille R.* Formal Concept Analysis: Foundations and Applications, Lecture Notes in Artificial Intelligence, no. 3626, Springer-Verlag, 2005. – 380 p.

2. *Spear A.*Ontology for the Twenty First Century: An Introduction with Recommendations, IFOMI, Saarbrücken, Germany. 2006.

3. *Глазунов М.М., Боровик В.М.* Бази даних в документно-інформаційній сфері: навч. посібник / М.М. Глазунов, В.М. Боровик. К.: Книжкове вид-во НАУ, 2009. – 88 с.

4. *Глазунов Н.М.* О сложностных оценках математических моделей баз данных и знаний // МНПК «АВІА-2007». К.: НАУ.- 2007.- С.14.46-14.49

5. *Глазунов Н.М.* Семантический веб и теоретико-категорные модели // Материалы международного семинара «Дискретная математика и её приложения». М.: МГУ. – 2007. – С. 309 - 311.

6. *Gabrie, P., Roiter A.* Representations of Finite-Dimensional Algebras. Berlin: Springer-Verlag. - 1992. – 375 p.

7. *Glazunov N.M.* Homological and Homotopical Algebra of Supersymmetries and Integrability to String Theory // Праці международної конференції NTST08. Proceedings of Int. Workshop “New Trends in Science and Technology” (NTST08)).- 6 p. http://ntst08.cankaya.edu.tr/proceedings/

8. *Glazunov N.M.* Toward a category theory design of ontological knowledge bases. 2009. ArXiv:0906.1694

УДК 004.724.4(045)

*И.Н. Давиденко, к.т.н. (Национальный авиационный университет, Украина),*
*К.Ю. Бабий (ООО "ГлобалЛоджик Украина", Украина)*

# СПОСОБ МОНИТОРИНГА КРУПНО МАСШТАБИРУЕМЫХ GRID-СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ПРОТОКОЛА SNMP

*В работе предложен способ мониторинга крупно-масштабируемых GRID-систем на основе протокола SNMP. Предложена новая сущность для поддержки распределенности – INMS, которая легко внедряется в стандартную структуру SNMP протокола. Преимуществами предложенного способа организации мониторинга GRID-систем большой размерности являются снижение затрат на коммуникации и повышение масштабируемости.*

Современное развитие вычислительной техники находится в переломной стадии, когда отдельные вычислительные узлы из-за технологических ограничений уже не в состоянии справляться с поставленными задачами в требуемом объеме и с заданным качеством. В таких условиях единственной альтернативой наращиванию мощности узла является объединение множества таких узлов в распределенные системы. Одним из наиболее перспективных подходов к созданию распределенных вычислительных систем является использование *GRID*-систем.

Важно отметить, что создание информационных *GRID*-систем изначально было вызвано необходимостью в обработке больших объемов информации, с которыми обычные компьютеры и даже кластерные системы уже не могли справиться. *GRID*-система включает не только инструменты менеджмента вычислений, но и инструменты управления ресурсами хранения данных, обеспечения безопасности доступа к данным, мониторинга использования и передвижения данных.

Под *GRID*-системой понимается тип распределенных систем, реализующих разделение, выбор и агрегацию географически распределенных ресурсов вне зависимости от используемой сетевой технологии, операционной платформы или административной организации. *GRID*-системы обладают следующими характеристиками:

- координация ресурсов, которые находятся вне централизованного управления;
- использование общих стандартных открытых протоколов и интерфейсов;
- предоставление нетривиального уровня качества обслуживания (*QoS*).

Тенденции развития *GRID*-систем состоят в оптимизации их гетерогенности, отказоустойчивости, масштабируемости и гибкости. В связи с тем, что *GRID*-система – это, в первую очередь, распределенная вычислительная система, то одной из важнейших её частей является система управления ресурсами, выполняющая задачи обнаружения, размещения, слежения и управления сетевыми ресурсами для обеспечения различных узловых и глобальных параметров качества обслуживания.

В результате чего, можно сделать вывод, что управление ресурсами *GRID*-системы состоит в выполнении ряда задач. Важнейшими среди которых, можно выделить следующие:

- эффективное разделение и координацию различных видов ресурсов;
- выполнение строгих функциональных требований от различных, а иногда конфликтующих, доменов;
- выполнение жестких нефункциональных требований, таких как надежность и эффективность в терминах потребления времени и загрузки узлов.

Требования, предъявляемые к системе управления ресурсами *GRID*-системы, делают задачу её организации сложной и не имеющей однозначного решения.

В настоящее время существует ряд решений поставленных задач, однако, остаются открытыми следующие вопросы:

- быстрое и динамичное обнаружение и резервирование вычислительных ресурсов;
- определение и нахождение свободных ресурсов;

– уменьшение времени анализа и планирования ресурсов (задержек);
– динамическое обнаружение и анализ ресурсов;
– решение задачи уменьшения задержек с учетом балансировки загрузки;
– распределение сетевых ресурсов между задачами.

Важно отметить, что механизм мониторинга составляет существенную часть всей *GRID*-системы. Информация, которую предоставляет мониторинговая система, используется при управлении ресурсами, планировании времени работы приложений, выявлении неисправностей, распространении информации о загрузке по всей системе и т.д. С точки зрения пользователя, назначение мониторинга заключается в измерении объема допустимых накладных расходов и производительности системы.

Наиболее просто реализовать механизм мониторинга можно за счет использования стандартизованного протокола сетевого мониторинга и управления *SNMP* (*Simple Network Management Protocol*). Большинство ресурсов уже используют *SNMP* демонов (агентов), которые снабжают систему информацией о текущем статусе ресурса. Большинство механизмов мониторинга, основанных на протоколе *SNMP*, являются централизованными, иначе говоря, управляющий менеджер собирает информацию о состоянии ресурсов у *SNMP* агентов.

Главными сущностями протокола *SNMP* являются:

– сетевая управляющая станция *NMS (Network Management Station)* – система, предназначенная для сбора информации с сетевых элементов;

– сетевой элемент *NE (Network Element)* – сетевое устройство или система, поддерживающая протокол *SNMP*;

– информационная база управления *MIB (Management Information Base)* – интерфейс метаданных, пердставляющий стандартизованное иерархическое представление доступных в *NE* данных и их структуры.

Основными операциями, предосмотренными протоколом *SNMP*, являются:

– *GET (GET-BULK) – NMS* получает значение (набор значений) из определенного *NE* согласно его *MIB*;

– *SET – NMS* изменяет значение параметра *NE*;

– *TRAP – NE* отправляет оповещение *NMS* об изменении своего состояния;

– *INFO – NMS* отправляет информационное сообщение другой *NMS*.

Важнейшим доводом в пользу использования стандартизованного *SNMP* протокола является существование большого количества готовых мониторинговых систем на его основе, как коммерческих, так и с открытыми исходными кодами. В качестве примера вторых можно привести *Cacti, Nagios, Zenoss, OpenNMS*. Такие системы можно рассматривать в качестве готовой платформы для разработки любой мониторинговой системы на основе *SNMP*, в том числе и мониторинговой подсистемы для *GRID*-системы. Это также является важным доводом в пользу предлагаемого подхода, поскольку значительно (в несколько раз) уменьшает требуемое время для разработки.

Централизованная архитектура, является наиболее подходящей для реализации мониторинговой подсистемы вычислительной *GRID*-системы, а также обладает существенными преимуществами, такими как простота и совместимость с большинством мониторинговых систем и механизмов. Кроме того, мониторинговые системы для централизованных архитектур требуют существенно меньше объема полосы пропускания и служебного трафика для передачи информации между менеджером и агентами, чем системы с децентрализованной архитектурой.

Основной проблемой такого подхода является масштабируемость. Дополнительно возникает вопрос о её отказоустойчивости, поскольку существует единственный *NMS*, отказ которой приведет к отказу системы в целом.

В централизованной системе мониторинга, *NMS* получает большие объемы данных через свой сетевой интерфейс. Однако, увеличивается загруженность связей, в связи с тем, что до этого данные проходят через несколько связей. Важно отметить, что хотя

производимые вычисления над полученными данными простые, но очень многочисленны, что приводит к высокой загрузке центрального процессора менеджера. Исходя из этого, видно, что *NMS* и ее сетевые связи могут стать узкой частью системы.

Распределенность такой системы снижает выше перечисленные затраты, за счет чего повышает производительность и надежность. Однако, это приводит к следующим трудностям: отсутствие общего контроля, проблемы синхронизации, пониженная стандартизация и значительно более высокая сложность.

В работе предлагается рассматривать распределенность и централизацию не как взаимоисключающие решения, а как граничные значения на шкале с множеством промежуточных точек. При правильной разработке архитектуры она должна динамически адаптироваться к требованиям пользователя.

В связи этим, предлагается за счет использования протокола *SNMP* в качестве основы механизма мониторинга *GRID*-системы, решить ряд задач управления *GRID*-системой:

– стандартизация протокола помогает обеспечить гетерогенность *GRID*-системы, то есть независимость от используемой сетевой технологии, операционной платформы или административной организации узлов;

– архитектура *SNMP* и его коммуникационные возможности предоставляют весь необходимый набор возможностей для реализации мониторинга вычислительной распределенной системы;

– третья версия *SNMP* содержит сообщения вида *INFO*, позволяющие перейти от полностью централизованной модели мониторинга к промежуточному решению;

– существование готовых мониторинговых систем с открытыми исходными кодами на основе протокола *SNMP* значительно сокращает сложность и время реализации системы мониторинга.

Рассмотрим более подробно последний пункт. Как было указано выше, основным недостатком централизованной симтемы мониторинга является ограниченная масштабируемость. Однако, протокол *SNMP* при реализации задачи мониторинга использует централизованную клиент-серверную структуру. В работе предлагается подход, который снижает затраты на коммуникации, повышает отказоустойчивость и, что самое главное, позволяет увеличить масштабируемость, что достигается за счет введения новой сущности – промежуточной управляющей станции *INMS* (*Intermediate Network Management Station*).

Задачи мониторинга делегируются от *NMS* к множеству *INMS*. При этом *INMS* действует как *NMS* по отношению к множеству подчиненных ей агентов, и, в то же время, как агент по отношению к *INMS* более высокого уровня. При этом *NMS* является вырожденным случаем *INMS* самого высокого уровня (рис.1).

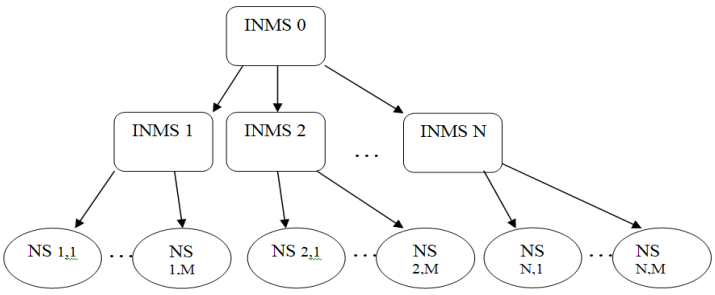



Рис. 1. Схема структуры мониторинговой подсистемы крупно масштабируемых *GRID*-систем на основе протокола *SNMP*

Реализация этой задачи потребует минимальных изменений в логике *NMS* и не потребует никаких изменений в *NE*, поскольку со стороны *NE* не изменится метод взаимодействия с мониторинговой системой. На рис.2 приведены численные результаты моделирования предложенного в статье решения в сравнении со стандартной централизованной системой мониторинга.

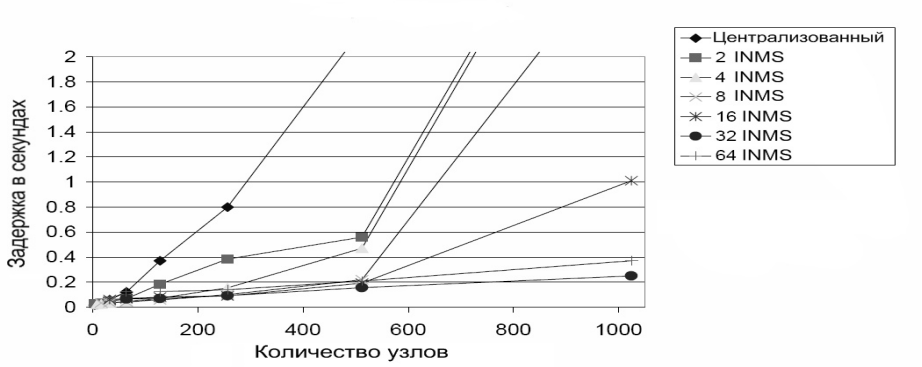



Рис. 2. Задержки в подсистеме управления *GRID*-системы в зависимости от её конфигурации и количества узлов

Анализируя полученные результаты можно сделать следующие выводы:

– слабо распределенные конфигурации (с небольшим количеством *INMS*) работают с задержками близкими к централизованной схеме;

– сильно распределенные конфигурации (с большим количеством *INMS*) работают с меньшими задержками.

Однако, конфигурация с множеством уровней *INMS* полезна только при возникновении узкого места в лице мониторинговой подсистемы из-за природы задач мониторинга и конфигурации системы. В других же случаях использование многоуровневой конфигурации уменьшает производительность из-за дополнительных задержек коммуникации на каждом уровне. Как это видно из результатов моделирования, для выбранной задачи мониторинга даже для достаточно большой сетевой сети (более 1000 узлов) наиболее эффективной оказалась конфигурация из 32 *INMS.*

## Выводы

В работе был предложен способ мониторинга крупно масштабируемых *GRID*-систем на основе протокола *SNMP*. Основной целью было предложить решение задачи масштабируемости системы мониторинга. Предложенное решение отличается относительной легкостью реализации и высоким уровнем интегрируемости за счет использования промышленных стандартов.

Предложена новая сущность для поддержки распределенности, названная *INMS*, которая легко внедряется в стандартную структуру *SNMP* системы. При помощи моделирования оценена производительность мониторинговой системы. Экспериментальные результаты показывают быстро растущие потери производительности централизованной мониторинговой системы за счет увеличивающихся задержек коммуникации с менеджером. В то же время, предложенная распределенная схема помогает решить эту задачу. Её производительность изменяется в зависимости от количества промежуточных мониторинговых узлов. При этом оптимальная конфигурация зависит от задачи мониторинга и размера целевой системы.

Предложенный способ организации мониторинга крупно масштабируемых *GRID*-систем помогает снизить затраты на коммуникации и повышает масштабируемость.

## Список литературы

1. *Subramanyan R., Miguel-Alonso J., Fortes J.,* A scalable SNMP-based distributed monitoring system for heterogeneous network computing. – Conference on High Performance Networking and Computing, IEEE Computer Society. – Washington, DC, USA, 2000. – P. 234–243.

2. *Coomer J., Chaubal C.,* Introduction to the Cluster Grid (Part 1). – Grid Computing, Sun BluePrints™, 2002. – P. 416.

УДК 004.942(045)

*А.С. Дуднік, аспірант,*
*О.М. Березовський, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ЗАСОБИ УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ БЕЗДРОТОВИХ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІВ КЕРУВАННЯ ЧЕРГАМИ

*В даній роботі розглянуте управління трафіком за допомогою алгоритмів керування чергами. В якості засобу управління трафіком виступає бездротова точка доступу (мережа WI-FI). Визначено недоліки і переваги алгоритмів керування чергами.*

Алгоритми управління чергами потрібні для роботи в періоди тимчасових перевантажень, якщо мережевий пристрій не може впоратися з передачею бітів на вихідний інтерфейс в тому темпі, в якому вони поступають. Якщо причиною перевантаження є недостатня продуктивність процесорного блоку мережевого пристрою бездротової мережі, то необроблені біти тимчасово накопичуються у вхідній черзі відповідного вхідного інтерфейсу. Черг до вхідного інтерфейсу може бути декілька, якщо диференціюються запити на обслуговування по декількох класах. У тому ж випадку, коли причина перевантаження полягає в обмеженій пропускній спроможності вихідного інтерфейсу, біти тимчасово зберігаються у вихідній черзі (або чергах) цього інтерфейсу.

Вирішення цієї проблеми є дуже важливим питанням. Алгоритми управління трафіком прошиваються розробниками в інтегральні схеми бездротових мережевих пристроїв (точок доступу *WI-FI*). Ці алгоритми мають велике значення для точки доступу, адже в них прописана її поведінка під час перевантажень.

Нажаль існуючі спеціалізовані засоби моделювання комп'ютерних мереж не розглядають трафік з точки зору теорії черг. Існуючі засоби можуть лише відображати окремі параметри трафіку як черги, але відобразити всі параметри в комплексі не може жоден спеціалізований засіб моделювання. Тому, якщо метою є розгляд алгоритмів керування чергами, то спеціалізовані засоби взагалі не підходять.

Рішення, що пропонується в роботі, побудоване за допомогою засобу імітаційного моделювання загального призначення. Даний засіб може розглянути будь-який процес, де є черга та обробляючий пристрій. Тобто задавши параметри роботи бездротової мережі, можна вирішити завдання, що описане вище. Але розв'язок даного завдання, за допомогою засобу моделювання загального призначення, не дивлячись на його простоту, вимагає значних ресурсів процесора.

Основним завданням даних досліджень являється моделювання бездротової передачі даних із застосуванням різних алгоритмів управління чергами. Визначення оптимального алгоритму управління трафіком, за допомогою проведення порівняльних характеристик. Алгоритми, що застосовуються для моделювання беруться довільно, не прив'язуючись до реальних пристроїв. Це є ще однією превагою даного засобу, бо в спеціалізованих засобх моделювання усе прив'язано до строго вказаних параметрів та умов.

Серед видів алгоритмів управління чергами є три основних, а всі інші являють собою різноманітні їх комбінації. Далі наведемо коротке описання основних алгоритмів.

У традиційному *алгоритмі FIFO* у разі перевантаження всі біти поміщаються в *одну* загальну чергу і вибираються з неї в тому порядку, в якому поступили. У всіх пристроях з комутацією бітів алгоритм *FIFO* використовується за умовчанням. Достоїнствами його є простота реалізації і відсутність потреби в конфігурації. Проте йому властивий і корінний недолік - неможливість *диференційованої обробки бітів різних потоків. Всі* біти стоять в загальній черзі на рівних підставах. Разом виявляються і біти чутливого до затримок голосового трафіку, і біти нечутливого до затримок, але дуже інтенсивного трафіку резервного копіювання, тривалі пульсації якого можуть надовго затримати голосовий пакет.

*Алгоритми пріоритетного обслуговування* дуже популярні в багатьох областях обчислювальної техніки, зокрема в операційних системах, коли одним застосуванням потрібно віддати перевагу перед іншими при обробці їх в мультипрограмній суміші. Застосовуються ці алгоритми і для переважної в порівнянні з іншими обробки одного класу трафіку.

Механізм пріоритетного обслуговування заснований на розділенні всього мережевого трафіку на невелику кількість класів і подальшого призначення кожному класу деякої числової ознаки - *пріоритету*.

*Класифікація трафіку* є окремим завданням. Біти можуть розбиватися на пріоритетні класи на підставі різних ознак: адреси призначення, адреси джерела, ідентифікатора додатку, що генерує цей трафік, будь-яких інших комбінацій ознак, які містяться в заголовках бітів. Правила класифікації бітів є частиною політики адміністрування мережі.

*Алгоритм зважених черг* розроблений для того, щоб можна було надати всім класам трафіку певний мінімум пропускної спроможності або гарантувати деякі вимоги до затримок. Під *вагою* даного класу розуміється відсоток такою, що надається класу трафіку пропускної спроможності від повної пропускної спроможності вихідного інтерфейсу.

При зваженому обслуговуванні так само, як при пріоритетному, трафік ділиться на декілька класів, і для кожного класу ведеться окрема черга бітів. Але з кожною чергою зв'язується *не пріоритет, а відсоток пропускної спроможності* ресурсу, що гарантується даному класу трафіку при перевантаженнях цього ресурсу. Для вхідного потоку таким ресурсом є процесор, а для вихідного потоку (після виконання комутації) - вихідний інтерфейс.

Концептуальні моделі мереж з застосуванням різних алгоритмів управління трафіком в мережах протоколу IEEE 802.11 представлені відкритою (незамкнутою) багатофазною системою масового обслуговування. З погляду класифікації Еталонної моделі описувалися два нижні рівні. Транзакт, що є неподільним об'єктом в системі імітаційного моделювання загального призначення, породжувався бітом, що переміщається в мережі WI-FI від джерела інформації до споживача. Кожна фаза моделювалася СМО (системи масового обслуговування) G\G\1 побудована згідно умов того чи іншого алгоритму управління чергами. Універсальна система імітаційного моделювання забезпечує збір і статистичну обробку даних про транзакти, затримані в кожній точці моделі, а також інтенсивності потоків відмов.

Імітація передачі даних в даній моделі буде проходити від станції-передавача до станції приймача через бездротову точку доступу, при моделюванні якої і будуть застосовані ті чи інші алгоритми управління чергами. Застосуємо в кожному з трьох перерахованих нижче стандартів різні алгоритми керування чергами. Звісно, що при цьому правила розподілу бітів в каналах передачі будуть різними.

Побудуємо 3 моделі мереж з наступними параметрами:

1. Мережа *WI-FI IEEE* 802.11a
   - Частота роботи мережі 5 ГГц;
   - Швидкість передачі даних 54 Мб/с;
   - Кількість каналів 1;
   - Кількість пристроїв 2;
   - Алгоритм управління чергами “*FIFO*”.
2. Мережа *WI-FI IEEE* 802.11b
   - Частота роботи мережі 2,4 ГГц;
   - Швидкість передачі даних 11 Мб/с;
   - Кількість каналів 4;
   - Кількість пристроїв 2;
   - Алгоритм управління чергами “*Алгоритм пріоритетного обслуговування*”.
3. Мережа *WI-FI IEEE* 802.11g

– Частота роботи мережі 2,4 ГГц;
– Швидкість передачі даних 54 Мб/с;
– Кількість каналів 4;
– Кількість пристроїв 2.
– Алгоритм управління чергами "*Зважені черги*".

Реалізуємо дану задачу за допомогою одного із засобів моделювання загального призначення, з використанням вище зазначених параметрів та алгоритмів управління трафіком бездротової мережі.

По тій причині, що в даній системі моделювання не можливо задати частоту буквально, вона виражена через період генерації за формулою: $\tau = 1 / f$, де $\tau$ – період генерації який буде застосовано в моделі замість частоти, $f$ – часто роботи мережі . Знайдемо період генерації для кожного окремого стандарту *WI-FI*:

$\tau_a = 1/ f_a = 1/5000000000$ Гц = 0,0000000002

$\tau_b = 1/ f_b = 1/2400000000$ Гц = 0,0000000004

$\tau_g = 1/ f_g = 1/2400000000$ Гц = 0,0000000004

Таким же чином виразимо швидкість роботи в мережі WI-FI через середній час обслуговування за формулою: $b = 1 / m$.

Де $b$ – середній час обслуговування, $m$ – швидкість передачі даних. Знайдемо швидкість передачі для кожного окремого стандарту WI-FI:

$b_a = 1 / m_a = 1/54000000$ біт/с = 0,0000000185

$b_b = 1 / m_m = 1/11000000$ біт/с = 0,00000009

$b_g = 1 / m_g = 1/54000000$ біт/с = 0,0000000185

З умов задачі видно, що стандарти b, g, n мають по 4 канали, стандарти 802.11 a, g, n – однакову швидкість передачі даних. Тому 0,0000000185 і 0,00000009 розділимо на 4. Отримаємо середній час обслуговування для кожного каналу. В 802.11g буде дорівнювати 0,0000000046, а в 802.11b – 0,0000000227. Підставивши ці числа у модель.

Запустивши програму моделі на виконання при 1000000 прогонів і зімітувавши максимальне навантаження на канали передачі, отримаємо наступні результати експерименту:

1.Час затримки в каналах передачі:
– Стандарт 802.11a – t = 0,000321 с;
– Стандарт 802.11b: t (канал №1) = 0,001652 с, t (Канал №2) = 0,001619 с, t (Канал №3) = 0,001619 с, t (Канал №4) 0,001589 с;
– Стандарт 802.11g: t (канал №1) = 0,000328 с, t (Канал №2) = 0,000326 с, t (Канал №3) = 0,000329 с, t (Канал №4) = 0,000329 с.

Обчислимо пропускну спроможність каналів для кожного з стандартів. Так, як транзакти в даній моделі замінюють роль бітів то пропускну спроможність можна за формулою: $C = \sum_{k=1}^{k} 1/t$ ($C$ – пропускна спроможність, $t$ – час затримки, $k$= кількість каналів). Маємо наступні результати:

– Пропускна спроможність для стандарту 802.11a – $C_a$= 1 / 0,000321с = 3,115 Мб/с;
– Пропускна спроможність для стандарту 802.11b – $C_b$ = 2,5 Мб/с;
– Пропускна спроможність для стандарту 802.11g – $C_g$ = 12,18 Мб/с;

Результати були підтверджені на спеціалізованому засобі моделювання.

2. Заповнимо отриманими значеннями порівняльну таблицю та за її даними складемо порівняльну характеристику роботи стандартів *WI-FI* та алгоритмів керування чергами, що застосовувались при їхньому моделюванні.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика результатів моделювання

| ТЕХНОЛОГІЯ | СТАНДАРТ | СУМАРНА ПРОПУСКНА СПРОМОЖНІСТЬ | ДАЛЬНІСТЬ |
|---|---|---|---|
| ***Wi-Fi*** | 802.11a | 3,115 Мб/с | Приблизно 300 м |
| ***Wi-Fi*** | 802.11b | 2,5 Мб/с | Приблизно 300 м |
| ***Wi-Fi*** | 802.11g | 12,18 Мб/с | Приблизно 300 м |

Оцінюючи дані результати можна сказати наступне:

- Стандарт 802.11a (Алгоритм управління чергами "*FIFO*")має наступні **переваги**: він вигідний при передачі файлів не великих розмірів, потребує порівняно низьких витрат енергії та має низьку ціну. **Недоліки:** за наявністю лише одного каналу при порівняно високій швидкості передачі даних має низьку пропускну спроможність. У разі перевантаження точки доступу буде застосовуватись алгоритм управління чергами "*FIFO*", який не пришвидшує передачу даних, а лише впорядковує її. Він доцільний там де потрібне впорядкування потоку даних;
- Стандарт 802.11b (*Алгоритм пріоритетного обслуговування*) має наступні **переваги**: він також вигідний при передачі файлів не великих розмірів, потребує порівняно низьких витрат енергії та має низьку ціну. За різницею між пропускною спроможністю і швидкістю він кращий ніж 802.11a (за рахунок 4 каналів). При сумарній пропускній спроможності 2,5 Мб/с його можна використовувати як Bluetooth з розширеними можливостями (він нагадує його за характеристиками). **Недоліки:** має низьку швидкість передачі даних. Алгоритм пріоритетного обслуговування хоча і підвищує швидкість за рахунок введення правил розподілу трафіку, але швидкість підвищується лише при передачі трафіку високих класів, а швидкість нижчих класів може значно погіршитись. Його доцільно застосовувати там, де є важливою ієрархія класів трафіку за тими чи іншими ознаками.
- Стандарт 802.11g має наступні (*Алгоритм «Зважені черги»*) **переваги**: найоптимальніший за показниками швидкості, пропускної спроможності та дальності передачі. Алгоритм зважених черг є найбільш оптимальним тому, що він розподіляє пропускну спроможність кожного класу трафіку так, що біти кожного окремого класу надходять на обробку рівномірно, що на змушує адресата довго чекати. **Недоліки**: високі затрати енергії та ціна.

За даними результатами, отриманими за допомогою засобів моделювання загального призначення, вже можна судити про те, яке обладнання потрібне в тій чи іншій ситуації. Та який алгоритм краще застосовувати в тому чи іншому обладнанні.

## Висновки

Після виконання даного дослідження були отримані наступні результати: проведено порівняльну характеристику моделей стандартів WI-FI, та алгоритмів управління чергами; побудовано моделі стандартів WI-FI за допомогою засобів загального призначення; обґрунтоване використання засобів загального призначення для моделювання бездротових комп'ютерних мереж.

## Список літератури


1. *Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. – С-Пб.,Питер Пресс : 2008. – 957 с.*
2. *Боев В. Д. Моделирование систем GPSS WORLD. – С-Пб.,БХВ-Петербург: 2004. – 405 с.*

УДК 004.272.43(045)

*О.В. Іванкевич, кандитат технічних наук*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ БУФЕРИЗАЦІЇ У СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ БАЗАМИ ДАНИХ ВЕЛИКИХ РОЗМІРІВ

*В статті проводиться аналіз методів та алгоритмів буферизації, що використовуються у сучасних системах управління базами данних, без яких неможливе створення великих інформаційних системах. Доведено необхідність використання більш продуктивних методів. Запропоновано ефективний та алгоритм заміщення сторінок для буферизації обмінів з дисками в паралельній системі баз даних без сумісного використання ресурсів, який дозволяє прискорити обробку великих баз даних.*

Більшість сучасних інформаційно-пошукових систем працює з великими масивами даних, тому перед користувачами таких систем часто постають проблеми підвищення продуктивності системи та швидкості отримання даних [1]. Для вирішення цієї задачі потрібно скористатись паралельними запитами до баз даних. У будь-якій системі баз даних при зверненні до сторінки диска образ сторінки завантажується в буфер, розташований в оперативній пам'яті, і зберігається там протягом деякого часу після звернення [2]. Тим самим скорочується кількість обмінів з дисками.

Для ефективної буферизації необхідно визначитись, яку сторінку ми повинні витіснити з буфера при браку місця для "підкачки" нової сторінки диска, тобто стратегія заміщення. Також необхідно визначити алгоритм, що реалізовує цю стратегію та визначити міру ефективності алгоритму - кількість виникаючих промахів, тобто ситуацій, коли вибирана сторінка не знаходиться в буфері. Білейді (*Bilady*) в своїх книзі показав, що теоретичний максимум ефективності визначається стратегією *OPT*: відповідно до цієї стратегії з буфера витісняється сторінка, до якої найдовше не буде звернень. Проте для реалізації стратегії *OPT* необхідна програма, яка могла б якісно передбачати майбутні зверненя до БД, тому на практиці реалізувати стратегію *OPT*, як правило, не вдається.

Зараз для управління буферним пулом практично у всіх випадках використовується стратегія заміщення *LRU* (*Least Recently Used*) [3], що витісняє з буфера ту сторінку, до якої найдовше не було звернень. Було доказано[3], що кількість промахів $F_{LYOJ}$ стратегії *LRU* обмежена зверху таким чином:

$$F_{LRU} \leq kF_{OPT},$$

де $k$ - кількість сторінок, що поміщаються в буфер, а $F_{OPT}$ - кількість промахів стратегії *OPT*.

Така стратегія не завжди адекватно зважає на специфіку систем баз даних великих обсягів [3,4], тому автором був розроблений ефективний метод заміщення сторінок для буферизації обмінів з дисками в паралельній системі баз даних без сумісного використання ресурсів. Запропонований метод є узагальненням методу *LFU*. Для запропонованого методу була побудована теоретико-імовірнісна модель, на основі якої отримані аналітичні оцінки для кількості промахів. На основі методу було розроблено алгоритм заміщення сторінок.

***Формальний опис алгоритму LRU-K.*** Нехай $N$ - кількість кешируємих сторінок диска. Нехай послідовність $r1, r2, \ldots, r_M$ задає деяку трасу звернень до сторінок диска, $M \geq 1$. При цьому менше значення індексу відповідає пізнішому за часом зверненню. Нехай задане деяке ціле $m$, $1 \leq m \leq M$. Для деякої фіксованої сторінки $i$ ($1 \leq i \leq N$) розглянемо послідовність $k_{t_1}, k_{t_2}, \ldots, k_{tm}$.

Тут $k_{ij} = \delta_{ir}$, для всіх j, $1 \le j \le m$ (де $\delta_{tr}$ - символ Кронекера). Нехай $F_{ll}(z)$ – основна функція для підпослідовності $k_{l1}, k_{l2}, \ldots, k_{lm}$ послідовності $1 \le l \le m$, отже за визначенням

$$F_{ll}(z) = \sum_{j=l}^{m} k_{lj} z^j$$

Нехай задане деяке ціле *h*, $1 \le h \le m$. Визначимо: $F_{ll}^{[0]}(z) = F_{ll}(z), F_{ll}^{[n]}(z) = F_{ll}^{[n-1]}(z) - F_{l,l+h}^{[n-1]}(z)$ для будь-кого цілого $n > 0$. Положимо: $F_l^{[n]}(z) = F_{l1}^{[n]}(z)$

Позначимо $t - \frac{m}{h}$ (без істотного обмеження спільності ми можемо вважати, що *m* завжди кратно *h*). Визначимо

$$W_{LFU-K}(i) = \sum_{n=0}^{K} \frac{F_i^{[n]}(1) t^n}{n!} \tag{6}$$

Для будь-якого цілого $K \ge 0$, отже маємо

$$W_{LFU-0}(i) = F_i(1) = F_i^{[0]}(1), \tag{7}$$

$$W_{LFU-1}(i) = F_i^{[0]}(1) + F_i^{[1]}(1)t, \tag{8}$$

$$W_{LFU-2}(i) = F_i^{[0]}(1) + F_i^{[1]}(1)t + F_i^{[2]}(1)\frac{t^2}{2} \tag{9}$$

Формула (7) підраховує число входжень сторінки *i* в послідовність

$$r1, r2, \ldots, r_M \tag{10}$$

Якщо припустити, що вірогідність звернення до сторінки *i* не міняється з часом $t_{t^2}$, то формула (7) може бути використана для оцінки кількості входжень сторінки *i* в послідовність чергових *m* звернень до сторінок диска:

$$r_{(-m+1)}, \ldots, r_{(-1)}, r_0 \tag{11}$$

Якщо ж вірогідність звернення до сторінки *i* змінюється з часом, то формула (8) може дати точнішу оцінку кількості входжень сторінки *i* в послідовність (11), оскільки другий доданок у формулі (8) якраз містить чинник швидкості зміни частоти звернень до сторінки *i*. При цьому очевидно, що точність оцінки залежатиме від величини параметрів *m* і *h*.

Аналогічним чином формула (9) може дати ще точнішу оцінку за рахунок чинника прискорення в третьому доданку, якщо фактор швидкості сам змінюється в часі. Таким чином, в загальному випадку ми приходимо до формули (6), яка дає нам наступне формальне визначення алгоритму *LFU-K*.

***Формальне визначення алгоритму LFU-K***. Для кожної сторінки диска, що знаходиться в буфері, обчислюється значення функції $R_{LFU-K}$. Заміщається сторінка, що має мінімальне значення $R_{LFU-K}$. Якщо таких сторінок декілька, заміщається та з них, яка найдовше знаходилася в буфері. При цьому алгоритм має два параметри *m* і *h*, що задовольняють обмеженням $1 \le h \le m$ і $1 \le m \le M$.

Очевидно, що при *m* = *M* алгоритм *LFU-0* співпадає з відомим алгоритмом *LFU*. Проте для певних варіантів завантаження алгоритм *LFU-K* при $K \ge 1$ може показувати значно вищу ефективність в порівнянні з *LFU* і іншими відомими алгоритмами.

Ефективність алгоритму *LFU-K* визначальним чином залежить від значень параметрів *m* і *h*. Отримання аналітичних оцінок для оптимального вибору вказаних параметрів в загальному випадку представляється нетривіальним завданням. Далі я надам аналітичну оцінку параметра *m* для різних розподілів вірогідності звернень до сторінок диска. Проблема підбору оптимальних значень параметра *h* буде розглянута далі.

Аналітична оцінка параметра *m*. Для отримання аналітичної оцінки параметра m побудуємо імовірнісну модель процесу звернення до сторінок диска в деякій абстрактній системі баз даних. Наша модель виходить з припущень, лежачих в основі моделі *IRM (Independent Reference Model)*.

Імовірнісна модель. Нехай *N* — кількість кешуємих сторінок. Визначимо рі як вірогідність звернення до сторінки *i*, $1 \le i \le M$ . За визначенням маємо

$$\sum_{i=1}^{N} p_i = 1$$

Припустимо, що вірогідність $p_i$ не міняється в часі і розподіляється по наступному закону:

$$p_i = \frac{1}{i^{\Theta} H_N^{(\Theta)}} \tag{12}$$

Тут $H_N^{(s)}$ — *N*-е гармонійне число порядку *s*, тобто $1^{-s}+2^{-s}+\cdots+N^{-s}$, а

$\Theta$ — коефіцієнт перекосу, $0 \le \Theta \le 1$ . При $\Theta$ = 0 отримуємо $p_i = \frac{1}{N}$, тобто перекіс відсутній, що відповідає випадку рівномірного розподілу. Значення $\Theta = 1 - \log 0.80 / \log 0.20$ відповідає правилу "80-20" . При $\Theta = 1$ отримуємо

$$p_i = \frac{1}{i^1 H_N^{(1)}} = \frac{1/H_N}{i},$$

що відповідає закону Зіпфа (*Zipf*).

Для гармонійних чисел порядку *r* відоме наступне наближення:

$$H_n^{(r)} = \vartheta(r) + \frac{n^{1-r}-1}{1-r} + \frac{1}{2n^r} - \sum_{k=1}^{m} \frac{B_{2k}}{2k n^{r+2k-1}} \binom{-r}{2k-1} + O\left(\frac{1}{n^{r+2m+1}}\right) \tag{13}$$

Тут $\vartheta(r)$ - дзета-функція Рімана, а $B_k$ - числа Бернуллі. Із (13) можна отримати спрощену формулу

$$H_n^{(r)} = \vartheta(r) + \frac{n^{1-r}-1}{1-r} + O\left(\frac{1}{n^r}\right) \tag{14}$$

Використовуючи наближення (14), із (12) отримаємо

$$p_i \approx \frac{1}{i^{\Theta}\left(\vartheta(\Theta) + \frac{N^{1-\Theta}-1}{1-\Theta}\right)} \tag{15}$$

Зокрема, вірогідність звернення до "найпопулярнішої" в нашій моделі сторінки 1 може бути знайдена по наступній наближеній формулі:

$$p_i \approx \frac{1}{\vartheta(\Theta) + \frac{N^{1-\Theta}-1}{1-\Theta}} \tag{16}$$

При досліджені впливу параметру m на алгоритм *LFU*-0, маємо:

$$\lim_{n\to\infty} \frac{R_{LFU-0}(i)}{n} = p_i$$

Це означає, що при збільшенні значення параметра *m* ефективність алгоритму *LFU-0* наближатиметься до ефективності алгоритму *A*0, що витісняє з буфера сторінку з мінімальною вірогідністю звернення. У роботі  було доведено, що алгоритм *A*0 є оптимальним для статичного розподілу вірогідності. Звідси витікає, що збільшення значення *m* вестиме до підвищення ефективності алгоритму *LFU-0*. Проте для практичної реалізації нам необхідна деяка міра, що зв'язує значення параметра m з ефективністю алгоритму *LFU-0*.

Таким чином, при фіксованому m великим значенням вірогідності *p* відповідає менше значення міри *M*. Даний результат є закономірним, оскільки чим більше вірогідність звернення до сторінки *i*, тим менша ділянка траси нам необхідна для визначення цієї

вірогідності із заданою точністю. При збільшенні значення *m* при фіксованому *p* значення міри *M* зменшується. Даний результат також представляється закономірним, оскільки чим більшу ділянку траси ми аналізуємо, тим точніше буде визначатися вірогідність звернення до сторінки з номером *i*. Запропонований метод буде використовуватись в кешувані даних у інформаційній системі, що працює з БД великих обсягів та забезпечує доступ до даних великої кількості користувачів.

## Висновки

В статті був запропонований новий метод заміщення сторінок *LFU-K*, що є узагальненням відомого алгоритму *LFU*. Для запропонованого алгоритму побудована теоретико-імовірнісна модель, на основі якої отримані аналітичні оцінки для параметра *m*. Параметри алгоритму, що залишилися, були досліджені в обчислювальних експериментах, і на основі отриманих результатів визначені рекомендовані значення даних параметрів. Запропонований метод може використовуватись в кешувані даних у інформаційних системах підприємств цивільної авіації, які працюють з БД великих обсягів та забезпечують доступ до даних великої кількості користувачів.

## Список літератури


1. *Chee Yong Chan , Beng Chin Ooi , Hongjun Lu,* Extensible Buffer Management of Indexes, Proceedings of the 18th International Conference on Very Large Data Bases, p.444-454, August 23-27, 1992.

2. *Rafael Alonso , Daniel Barbara , Hector Garcia-Molina*, Data caching issues in an information retrieval system, ACM Transactions on Database Systems (TODS), v.15 n.3, p.359-384, Sept. 1990

3. *Asit Dan , Don Towsley*, An approximate analysis of the LRU and FIFO buffer replacement schemes, ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, v.18 n.1, p.143-152, May 1990.

4. *Wolfgang Effelsberg , Theo Haerder*, Principles of database buffer management, ACM Transactions on Database Systems (TODS), v.9 n.4, p.560-595, Dec. 1984.

5. *Дейт К.Дж.* Введение в системы баз данных / Пер. с англ. – 6-е изд. – М., СПб., К.: "Вильямс", 2000. – 846с.

6.*Мамаев Е.В.* MS SOL Server 7.0: проектирование и реализация баз данных. – Санкт-Петербург, 2000. – 416 с.

7.*Шаша Деннис, Бонне Филипп,* Оптимизация баз данных: принципы, практика, решение проблем: пер. с англ. – Москва: Кудиц-образ, 2004. – 431 с.

УДК 656.7.071:658.386

*С.Г. Косачевский, канд. техн. наук*
*(Ульяновское высшее авиационное училище*
*гражданской авиации (институт), Российская Федерация)*

# ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНТРОЛЬНО-КОРРЕКЦИОННОЙ ФУНКЦИИ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ПОДГОТОВКИ ЛЕТНОГО СОСТАВА

*Рассматриваются особенности организации контроля качества подготовки летного состава в автоматизированных обучающих системах.*

Важнейшей функцией любой дидактической системы является контрольно-коррекционная, которая должна обеспечивать контроль достижения заданных целей и, в случае необходимости, корректировку процесса обучения.

Для реализации контрольно-коррекционной функции при подготовке летного состава (ЛС) ИКАО рекомендует использование тестирования, позволяющего обеспечить непрерывное и объективное оценивание процесса обучения. Компетентностный подход к подготовке ЛС предполагает модульную структуру процесса обучения. По этой причине контроль учебного процесса должен быть распределенным, т.е. обеспечивающим контроль усвоения каждого модуля, а, в случае необходимости, и его составляющих - микромодулей. Кроме того, необходимо обеспечить контроль всех составляющих профессиональных компетенций.

Особое значение контрольно-коррекционная функция приобретает для автоматизированных обучающих систем (АОС), которые предъявляют целый ряд принципиально новых требований как к организации и методике проведения процесса обучения, так и к самому обучающемуся, который должен обладать более высоким по сравнению с традиционными формами обучения уровнем развития потребностно-мотивационной, познавательной и эмоционально-волевой сфер [1]. Компенсацию различного уровня развития этих качеств обучающихся и должна обеспечить реализуемая в АОС контрольно-коррекционная функция. Кроме того, она должна исключить возникновение «иллюзии усвоения», когда при первоначальном ознакомлении с материалом у обучающегося создается вполне добросовестное заблуждение об усвоении изучаемого материала, и он прекращает предлагаемую ему учебную деятельность либо выполняет ее неполноценно [2].

В соответствии с рекомендациями ИКАО критерии для оценки качества подготовки ЛС должны основываться на целях подготовки, которые должны быть четко сформулированы и включать [3]:

- показатели эффективности, т.е. что обучающийся должен уметь делать по окончании срока или этапа подготовки;
- стандарты эффективности, содержащие критерии, с помощью которых оценивается работа обучающихся, и которые могут быть сформулированы в виде предельных допусков, ограничений, темпа выполнения операций и других количественных характеристик;
- условия, в которых обучающийся должен демонстрировать свою подготовку.

В свою очередь, цели подготовки определяются на основе анализа профессиональной деятельности и формулируются в виде, позволяющем осуществлять их наблюдение и измерение. Основная цель измерения в данном случае заключается в получении численных эквивалентов степени выраженности интересующего признака. Традиционные экзамены не позволяют получить численных эквивалентов профессиональной подготовки пилотов из-за отсутствия стандартизированных требований и субъективности оценки. По этой причине, в качестве инструмента для проведения измерений качества обучения предпочтительнее использование тестов, обеспечивающих количественное сопоставления результатов обучения с заданными нормативами. Такие тесты в документах ИКАО называются тестами,

соотнесенными с критериями (criterion–referenced test), в отличие от теста, соотнесенного с нормой (norm–referenced test), когда суждения выносятся на основе сравнения показателей обучающихся друг с другом [3,4]. Если обучающийся демонстрирует, что требуемый норматив им достигнут или превзойден, то он получает положительную оценку независимо от сравнения с другими обучающимися. Рекомендуется двухбалльная система оценки «зачет» или «незачет».

Как уже отмечалось, в соответствии со стандартами и рекомендуемой практикой ИКАО разработка учебного плана подготовки пилота должна начинаться с формирования целевых показателей. Цели подготовки должны определять операции и действия, которые должен освоить обучающийся, стандарт и условия, относящиеся к тому, что должен выполнить обучающийся для достижения заданного уровня квалификации. Методология ИКАО предусматривает освоение двух категорий навыков:

- интеллектуальные навыки, которые можно подразделить на умение классифицировать, различать, использовать правила и решать проблемы;
- физические (моторные) навыки.

Для определения этих навыков первостепенное значение имеет изучения строения профессиональной деятельности ЛС. С точки зрения компетентностного подхода к обучению ЛС, представляется плодотворной концепция опорных фрагментов деятельности (ОФД). По мнению автора этой концепции профессора Г.В. Коваленко, подход к оценке результатов деятельности ЛС по прямому учету этих результатов, т.е. учитывающий только отклонения, оказывается малоинформативным с точки зрения выявления причин недостатков в подготовке и совершенствования программ. В тоже время, чрезмерная детализация деятельности приводит к отрыву от ее смысла и орудий труда, что также не позволяет выявить недостатки и выработать рекомендации по совершенствованию учебных программ. Возникает задача нахождения наилучшей детализации деятельности, которая позволила бы при анализе ее результатов или ее фрагментов не только регистрировать отклонения, но и определить его причину. На решение этой проблемы и направлена концепция ОФД, которые занимают промежуточное положение между результатами деятельности и ее микроэлементами [5].

Различие между существующим и предлагаемым подходом заключается в переходе от внешних проявлений деятельности к оценке внутренних элементов деятельности и действий, характеристики которых определяют и внешние проявления действий. При этом отмечается возможность с помощью ОФД исследовать внутреннюю картину движений, называемую часто «внутренней моторикой», т.е. моторикой, не входящей в состав внешних движений, непосредственно выполняющих данный двигательный акт. Внутренняя моторика обладает, по мнению некоторых исследователей, группой свойств, которые отражают внутреннее отношение человека к тому, что он делает. Она связана с личностными установками человека, с мотивами, определяющими его отношение к ситуации.

С точки зрения компетентностного подхода это представляет особый интерес, т.к. позволяет определить пути оценки отношения к делу - одной из составляющих профессиональной компетенции, оценить которую имеющимися средствами достаточно сложно. Кроме того, ОФД позволяют рассматривать в комплексе когнитивные и исполнительные компоненты действий, что также дает возможность оценить знания и навыки, являющиеся составляющими компетенций.

С другой стороны, концепция ОФД хорошо согласуется с основными положениями теории трансформационного обучения (ТТО) [6], рассматривающей обучения как процесс непрерывного формирования и трансформации стратегий деятельности обучающегося. Очевидно, что исследование этого процесса также требует более глубокого, чем только оценка конечных результатов, анализа деятельности.

С целью формирования обобщенных критериев контроля подготовки ЛС необходимо, в первую очередь, выработать общий подход к определению условий обученности. С этой целью можно воспользоваться системой правил и условий, разработанных для оценки

обученности человека – оператора, в соответствии с которой процесс обучения сводится к последовательному предъявлению обучающемуся задач, многократное решение которых приводит к появлению у него соответствующих навыков. По мере приобретения навыка действия обучающегося характеризуются некоторой степенью статистической устойчивости [7].

В соответствии с этим подходом, весь процесс обучения можно разделить на три этапа (рис. 1):

- I этап первоначальной «приработки» человека к режиму работы, на котором формируется структура деятельности;
- II – этап отработки параметров структуры, в пределах которого обучающийся знает, что и в какой последовательности следует выполнять, но действия его недостаточно точны и своевременны;
- III – этап статистически стабильного уровня сформированных в процессе обучения навыков.

Исходя из такого представления процесса обучения его завершение можно планировать по условию достижения необходимого состояния обученности ($Y(n) \geq Y_{пор}$) и обеспечению требуемой стабильности результатов обучения.

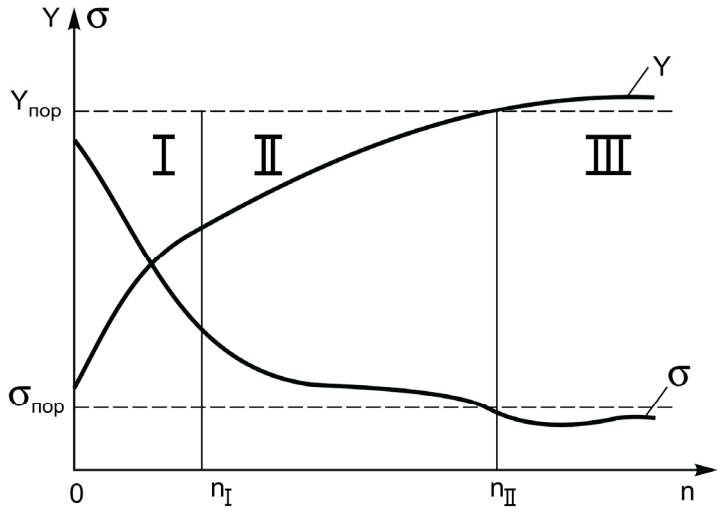



Рис.1. Этапы обучения оператора [6]

Y –мера обученности;
$Y_{пор}$ – пороговое значение меры обученности;
σ –среднее квадратичное отклонение меры обученности;
$\sigma_{пор}$ – пороговое отклонение среднего квадратичного отклонения меры обученности;
n – число циклов предъявления задачи, подлежащей решению.

Однако, применение этих очевидных условий завершения процесса обучения усложняется, если в соответствии с ТТО предположить, что кривая обученности имеет немонотонный характер. Кроме того, в соответствии с ТТО при организации процесса обучения сложным видам профессиональной деятельности, определении его продолжительности и конечного уровня подготовки должна оцениваться применяемая стратегия действий обучающегося [8].

В качестве обоснования необходимости учета стратегии при определении продолжительности обучения можно привести кривые обучения операторов при использовании различных технических средств (рис.2) [8]. Из рисунка видно, что выполнение определенного задания за 132 с при использовании первой методики обучения может быть достигнуто при пяти совершенно разных способах, или, в терминах трансформационного обучения – стратегиях решения задачи (рис.2, кривая 1).

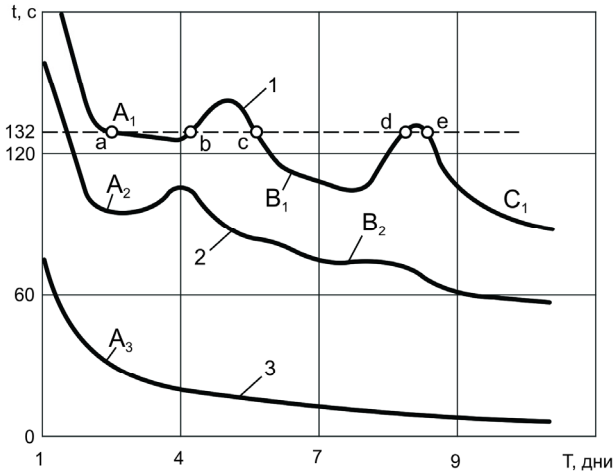



Рис.2. Динамика обучения операторов при различных методиках обучения
(t – время решения задачи, T – продолжительность обучения) [7]

С учетом компетентностного подхода к обучению и основных положений ТТО для определения уровня обученности должны быть использованы следующие критерии:

1. Оценка освоения обучающимся заданной стратегии действий.
2. Условие достижения состояния обученности:

$Y(n) \geq Y_{пор}$;

3. Условие достижения плато на кривой обучения, соответствующего заданной стратегии:

$Y(n+1)-Y(n) \leq \upsilon_Y$;

4. Условие достижения заданной стабильности результатов обучения при использовании заданной стратегии:

$$\sigma(n) \leq \sigma_{пор}$$

## Список литературы


1. *Репьев Ю.Г.* Интерактивное самообучение. – М.: Логос, 2004. – 248с.

2. *Беспалько В.П.* Основы теории педагогических систем: проблемы и методы психолого-педагогического обеспечения технических обучающих систем / *В.П. Беспалько.* - Воронеж: Изд. Воронежского университета, 1977. – 304с.

3. Подготовка персонала. Правила аэронавигационного обслуживания : Doc. 9868. – Монреаль : ИКАО, 2006.

4. Training. Procedures for Air Navigation Services : Doc 9868. – ICAO, 2006.

5. Совершенствование профессиональной подготовки летного и диспетчерского составов / *Г.В.Коваленко* и др.; под ред. *Г.А.Крыжановского*. – М.: Транспорт, 1996. – 320 с.

6. *Шибанов Г.П.* Количественная оценка деятельности человека в системе «человек-техника» / *Г.П.Шибанов.* – М.: Машиностроение, 1983. – 263 с.

7. *Косачевский С.Г.* Применение теории трансформационного обучения для разработки автоматизированных обучающих систем подготовки летного состава / *С.Г. Косачевский* // Научный вестник МГТУГА. Сер. Аэромеханика и прочность. – 2007. – № 111. – С. 172 – 175.

8. *Венда В.Ф.* Системы гибридного интеллекта: Эволюция, психология, информатика / *В.Ф.Венда.* - М.: Машиностроение, 1990.- 448с.

УДК 004.7(045)

*Г.М. Кременецький, к.т.н. (Національний авіаційний університет, Україна)*

# ВИКОРИСТАННЯ МЕХАНІЗМІВ WEB-СЕРВІСІВ ДЛЯ ПОБУДОВИ ДИНАМІЧНО КЛАСТЕРИЗУЄМИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

*В статті проведено аналіз позитивних та негативних сторін протоколів взаємодії Web-сервісів стосовно розподілених обчислень і зокрема функціонування динамічно кластеризуємих нейронних мереж. Розглянуто архітектуру побудови кластеризуємої нейронної мережі на основі Web-сервісів. Запропоновано об'єктну модель для опису інтерфейсу взаємодії компонентів динамічно кластеризуємої нейронної мережі.*

Проблеми використання та обробки інформації в мережі Інтернет дуже гостро постають серед учасників цієї мережі.

По-перше, велика кількість різноманітної інформації: *Web*-сторінки – візитні картки людей та фірм, *Web*-портали, соціальні мережі, файлові сховища, відео та аудіо сервіси, різноманітні сервіси покупки/продажу товарів та ін.

По-друге, відсутність стандартів надання інформації на початку створення мережі таких, наприклад, як у системах керування базами даних (СКБД).

Для вирішення проблем інтеграції різних підсистем у мережі Інтернет було розроблено технологію Web-сервісів [1,2]. Цю технологію вже використовують найбільші гравці ринку Інтернету провідні пошукові гіганти *Google* та *Yahoo*. Тому цей стандарт має велике майбутнє. Для взаємодії із *Web*-сервісом необхідно відправити XML- повідомлення через *HTTP* протокол. Оскільки кожен сумісний з Інтернет пристрій підтримує протокол *HTTP*, і практично кожна мова програмування має доступ до *XML*- аналізатора, тому обмежень, що стосуються розробки додатків на базі *Web*-сервісів майже не існує. *Web*-сервіс – це фрагмент бізнес логіки, до якого можна отримати доступ через Інтернет. Наприклад, сайти електронної комерції можуть використовувати *Web*-сервіс компанії, що займається доставкою і пакуванням для обчислення вартості доставки того чи іншого товару. Сайти новин можуть збирати заголовки новин і статті, що складаються зовнішніми службами новин і відображати їх на своїх власних сторінках у реальному часі. Компанія може навіть надавати в реальному часі значення своїх фондових опціонів, зчитуючи з якогось фінансового чи інвестиційного сайту. *Web*-сервіси – це нова технологія, що створена для вирішення великої кількості проблем і недоліків, які виникали в попередніх технологіях розподіленої обробки даних. *Web*-сервіс – фрагмент логіки програми (компонент), який може викликатись віддалено через Інтернет. Задачі у технології *Web*-сервісів ті й що у технології компонентних об'єктів, наприклад, таких як *DCOM (Distributed Component Object Model)*, головними із яких є спрощення процесу зборки додатку із існуючих модулів, забезпечення спільного використання функціональних можливостей організаціям і партнерам та дозволити створювати програми, що складаються із великої кількості модулів які крім того можуть знаходитись у різних куточках світу. В технології *Web*-сервісів робиться акцент на функціональній сумісності. Усі платформи для розробки програмного забезпечення, які дозволяють створювати *Web*-сервіси, використовують однакові принципи відкритих стандартів *XML*, що гарантує можливість створення *Web*-сервісу використовуючи мову *.NET* і викликати його з *Java* додатка, або навпаки.

Використання *Web*-сервісів дозволяє розділити логіку додатку на блоки, які будуть виконуватись на двох чи більшій кількості комп'ютерних систем. Причин для розподілення логіки програм достатньо багато. Висока масштабованість. Розділення логіки додатку для розподілу навантаження між різними обчислювальними вузлами. Ці рішення не призводять до покращення продуктивності додатку для окремого користувача, але підвищує масштабованість додатку, тим самим дозволяючи йому обслуговувати одночасно набагато більшу кількість користувачів.

*Web*-сервіси мають наступні позитивні якості: просте розгортання, можливість часткового оновлення програми, додаток може бути легко територіально розподілено, додаток збирається розробником як конструктор.

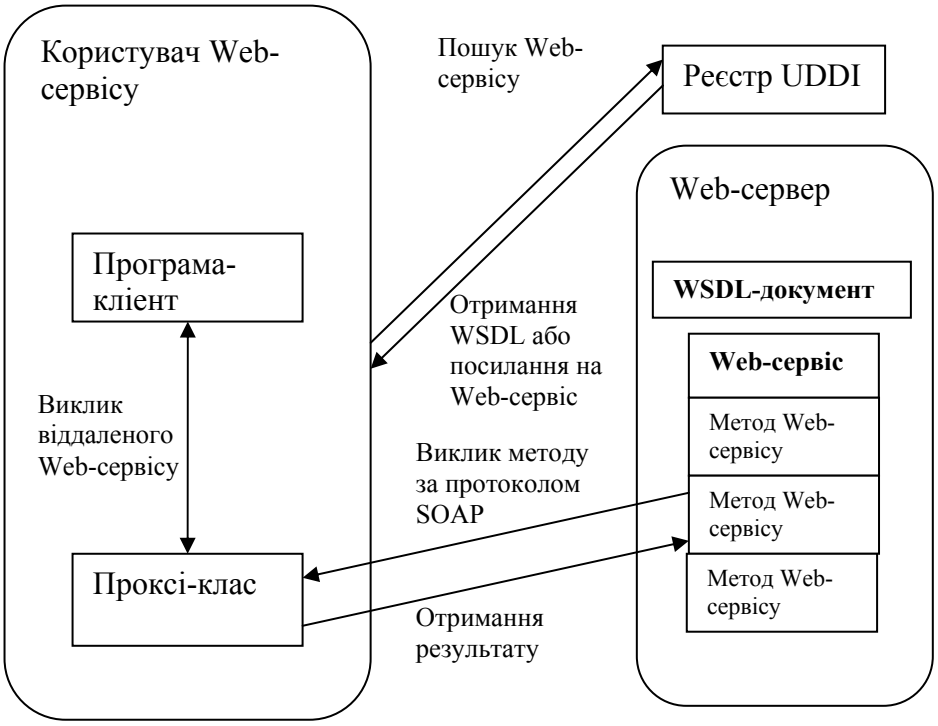



Рис. 1. Архітектура кластеризованої нейронної мережі на основі *Web*-сервісів

Завдяки використанню *Web*-сервісів розподілений додаток має можливість розгортання за межами компанії чи організації, наприклад, розподілені компоненти можна використовувати для того щоб дозволяти торговим партнерам робити запити на каталоги продуктів компанії. Таке рішення дозволяє організовувати різні шари безпеки. Доступ до СКБД можливо розподіляти не тільки за користувачами а і за компонентами що значно знижує ризики викрадення конфіденційних даних.

З появою Internet ступінь важливості і застосовності технологій розподіленої обробки даних значно виросла. Простота і розповсюдження Internet роблять цю мережу повністю логічним вибором для основи розподілених додатків. До появи Web-сервісів домінуючими протоколами були *DCOM* та *CORBA (*Common Object Request Broker Architecture*)*. Хоча протоколи *DCOM* і *CORBA* мають багато спільного, в деяких моментах, вони сильно відрізняються, що робить їх взаємодію практично неможливою.

Нейронні мережі, як механізм багатомірної апроксимації і класифікації, не завжди можна застосувати через велику кількість обчислень, які необхідно проводити як у робочому циклі, так і на етапі навчання. Однак, нейронні мережі знаходять застосування у широкому колі практичних задач, від систем балістичних ракет і торпед, до прогнозів погоди на найближчі дні, систем розпізнавання графічної та текстової інформації.

Розподілені обчислення для підвищення швидкості роботи нейронної мережі логічний крок особливо у зв’язку з їх побудовою. Наступний логічний крок для побудови нейронних мереж у Інтрнеті – використання *Web*-сервісів. У процесі розподілення обчислень між великою кількістю обчислювальних вузлів, можна зіткнутися із проблемою обмеженої швидкості передачі даних в комп`ютерних мережах. Для вирішення даної проблеми можна скористатися кластерізацією. У цьому випадку більшість мережевих взаємодій створюється у кластері, а обмін даними між кластерами мінімальний.

На рис. 2 представлена архітектура кластеризованої нейронної мережі на основі *Web*-сервісів.

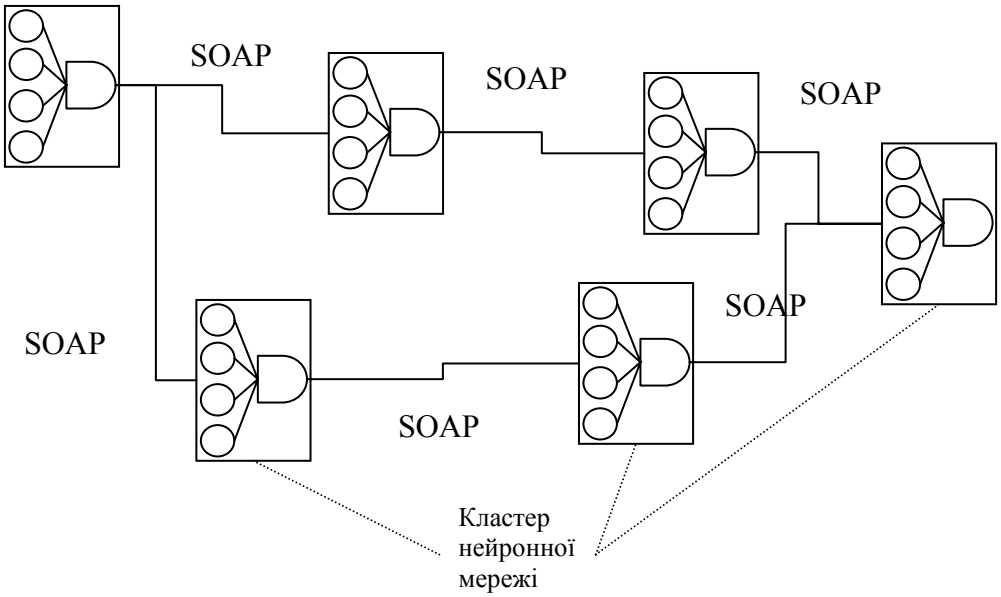



Рис. 2. Архітектура кластеризованої нейронної мережі на основі *Web*-сервісів

Обмін даними між клієнтом-споживачем і провайдером-постачальником послуг – це передача *SOAP*-повідомлень. Протокол *SOAP* пропонує спосіб формування повідомлень в *XML*-форматі, заснований на об'єктній моделі *XML*-документа *DOM (Document Object Model)*. *SOAP*-повідомлення – це ієрархічна структура вкладених XML-елементів (або вузлів): *SOAPMessage*, *SOAPPart*, *SOAPEnvelope*, *SOAPHeader*, *SOAPBody* і вміст передаваного повідомлення, також у форматі *XML* (*XML content*). На рис. 3 представлена ієрархічна структура *SOAP*-повідомлення.

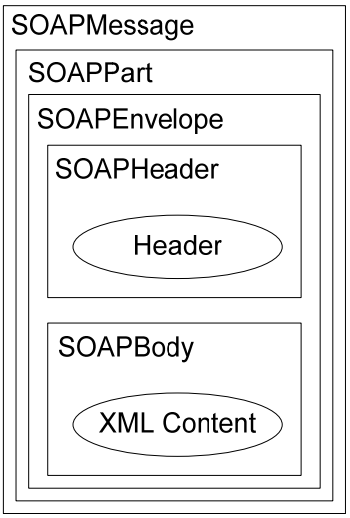



Рис. 3. Ієрархічна структура *SOAP*-повідомлення

Взаємодія між кластерами нейронної мережі організовано наступним чином [3]. Нейронна мережа будується с застосуванням наступних базових класів рис. 4. *CNeuroNet* – цей клас зберігає структуру всієї мережі. До нього входять класи шарів мережі *CNeuroneLayer*. Клас *CNeuroneLayer* – включає до себе всі нейрони визначеного шару нейронної мережі *CNeurone*. Клас *CNeurone* – це базови клас для усіх типів нейронів у мережі.

До класу *CNeuroNet* можуть входити як об’єкти *CNeuroneLayer* поточного обчислювального так і віртуальні об’єкти. Взаємодія з віртуальними об’єктами *CNeuroneLayer* організована з використанням технології *Web*-сервісів.

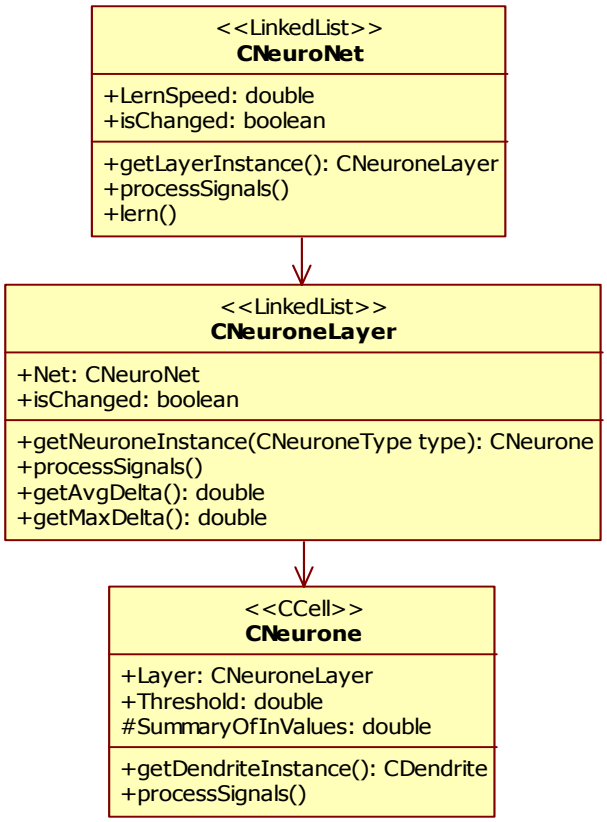



Рис. 4. UML діаграма структури базових класів.

Кожен шар нейронної мережі може бути реалізовано, як нейронна мережа на іншому обчислювальному вузлі. Але для поточної нейронної мережі вона буде виглядати як шар нейронів зі своїми входами та виходами.

## Висновки

Використання *Web*-сервісів для побудови динамічно кластеризуємої нейронної мережі дозволить легко та не відходячи від об’єктної моделі організовувати різноманітні конфігурації нейронної мережі. Також, *Web*-сервіси дозволять зберігати створений код при зміні структури мережі. Потрібно буде лише змінити відповідні файли налаштування.

Вищезазначені властивості *Web*-сервісів: легкість перебудови структури, повторне використання коду, об’єктний підхід, розподіленість обчислень на рівні об’єктів дозволять обробити багато варіантів алгоритмів кластеризації нейронних мереж та обрати найбільш ефективні с точки зору швидкодії та якості функціонування.

## Список літератури

1. *Генри Бекет, Мераж Куннумпурат, Шон Роди, Андре Тост* Java. Основы Web-служб. – М.: Издательство «КУДИЦ-Образ», 2004. – 464 с.

2. *Генри Бекет* Java SOAP для профессионалов. – М.: Издательство «Лори», 2004. – 458 с.
*Саймон Хайкин* Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1105 с.

УДК 004.724.4(045)

*Ю.О. Кулаков, д.т.н., доцент,*
*І.А. Клименко, к.т.н., доцент*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ОСОБЛИВОСТІ ПЛАНУВАННЯ В МОБІЛЬНИХ GRID

*Розглянуті проблеми застосування концепції GRID в мобільних комп'ютерних мережах. Запропоновано нову всебічну систематизацію і опис методів планування в мобільних GRID з ціллю їх класифікації, характеристики та забезпечення передумов для розробки нових механізмів планування.*

В останні роки, вслід бурхливого розвитку потужних комп'ютерів та зниження їх вартості, *GRID* розвилася у перспективне середовище для високоефективних обчислень та зберігання надвеликих об'ємів даних з високою пропускною та обчислювальною здатністю.

В свою чергу високий рівень розвитку і розповсюдження мобільних технологій у всьому світі та широкий діапазон їх застосування не змогли не оказати вплив на подальший розвиток *GRID*. Тому найбільш актуальні сучасні дослідження в області *GRID* присвячені необхідності рішення проблеми сумісності *GRID* і мобільних мереж. В даному контексті доцільно визначити область застосування мобільних *GRID*. Бездротові пристрої, що мають досить обмежені ресурси обчислювальної потужності, енергії і невеликий адресний простір, отримають можливість для рішення обчислювальних завдань будь-якої складності та зберігання великих об'ємів даних за рахунок використання додаткових ресурсів, доступних за поєднання в *GRID*. Так епізодичні мобільні комп'ютерні мережі класу *Ad Hoc,* розвернуті в гарячих точках, можна розглядати як єдиний розподілений обчислювальний ресурс, або забезпечити застосування додатків *GRID* в тих місцях де це можна лише уявити. Слід зазначити, що в майбутньому пропонована технологія могла б увійти в набір звичайних послуг для мобільних користувачів.

Мобільні *GRID* у першу чергу характеризується динамічною структурою й допускають як переміщення користувачів *GRID* так і переміщення запитуваних ресурсів. Вузли мобільних *GRID* на є кластерами або суперкомп'ютерами, це довільний діапазон мобільних пристроїв, які в першу чергу характеризуються гетерогенними властивостями: обчислювальний ресурс процесора, об'єм пам'яті, пропускна здатність каналів зв'язку, затримка. Окрім того, мобільна мережа піддана проблемам розриву зв'язків і виходу вузлів із строю або переміщення за межі досяжності. Характеристики й особливості мобільних *GRID* спричинюють необхідність розробки нових стратегій управління й планування з урахуванням необхідності динамічної реконфигурації мережі.

Мобільні *GRID* визивають широкий інтерес сучасності. Найбільш успішні досягнення представлені в роботах [1, 2]. Програма електронної охорони здоров'я, що розвинута в країнах ЄС підтримує розгортання мереж медичної інформації на базі стаціонарних та бездротових інфраструктур і *GRID*–технологій [3]. Також привертає увагу відомий проект ЄС *AKOGRIMO*, пов'язаний з впровадженням базових концепцій *GRID* в область мобільного Інтернет [4].

## Постановка задачі

Мобільні *GRID* є різновидом *GRID*, хоча між ними є істотні відмінності обумовлені динамічною природою останніх. Як уже було відмічено мобільні *GRID*–обчислення ускладнені гетерогенними й функціональними особливостями вузлів [4, 5], оскільки в їх якості застосовані звичайні мобільні комп'ютери або інші мобільні термінали, поєднані в епізодичну мережу. Розглядаючи клас мобільних комп'ютерних мереж *Ad Hoc*, слід враховувати й їх особливості, такі як відсутність інфраструктури та будь якого централізованого управління, вслід чого необхідність виконання вузлом як функцій рядового

вузла так і функцій сервера *GRID*. Динамічна природа мобільних *GRID* приводить до того, що мобільні вузли мають гетерогенний час виконання підзадачи, і можуть зупиняти обчислення довільно у випадку непередбаченого переміщення. У зв'язку з цим сумісне виконання завдання тимчасово відкладається і виникають проблеми реконфігурації, реплікації, резервування даних, тощо. Такі нестабільні ситуації називаються автономними відмовами, вони приводять до затримки й блокування виконання підзадач і як слідство до часткової або повної втрати результатів виконання завдання. Зазначені проблеми ускладнюють планування і управління виконуваними підзадачами. Таким чином, необхідно розробити механізми планування, які б адаптувалися до динамічного обчислювального середовища.

Мобільні *GRID* вивчаються достатньо нещодавно, тому на сьогодні не існує будь якої загальної систематизації або опису цієї технології. Таким чином існують складнощі з визначенням, архітектурою, моделлю та додатками мобільних *GRID*, за рахунок чого значно ускладнюється їх розробка. Планування в мобільних *GRID* достатньо складна задача внаслідок ненадійної і мінливої структури мобільної мережі, але не існує також систематизації та опису відповідних методів планування. Ми пропонуємо нову всебічну систематизацію і опис методів планування в мобільних *GRID* з ціллю їх класифікації, характеристики та передумов для розробки нових механізмів планування.

## Систематизація планування в мобільних *GRID*.

Систематизація планування в мобільних *GRID* розглядається на трьох рівнях: рівень додатків, рівень ресурсів і рівень планувальника.

*Рівень додатків*

Планувальник мобільних *GRID* повинен враховувати наступні особливості додатка під час розробки й створення механізмів планування.

– *Взаємозалежність між підзадачами*. Планувальник ураховує фізичні можливості вузла, надійність, пропускну здатність, залежність даних і підзадач одночасно з метою мінімізації загального часу виконання підзадачі. У випадку незалежних завдань, планувальник зосереджується на розподілі незалежних підзадач відповідно до надійності, можливостей й характеристик ресурсів [1, 6, 7].

– *Тип додатку*. Оцінюється ресурс вузла відповідно до обчислювальної складності завдання або об'єму даних для передавання.

– *Можливість розподілу.* Планувальник зосереджується на тому, яка кількість обчислень призначена даному ресурсу [7, 8]. Розмір підзадачі залежить від можливостей ресурсу.

– *Спосіб завдання.* Тут важливо врахувати чи задає завдання клієнт до початку роботи планувальника або під час планування.

– *Якість обслуговування*. Деякі додатки можуть вимагати забезпечення якості обслуговування під час виконання. Тут розглядаються ситуації коли деякий додаток необхідно завершити в строго встановлений строк, або деякі додатки не бажають бути приписані до конкретних вузлів або домену. Інші додатки вимагають підтвердження коректності результату.

*Рівень ресурсів*

Планувальник мобільних *GRID* повинен ураховувати наступні особливості ресурсів під час розробки й створення алгоритму планування.

– *Готовність до виконання завдання*. Планувальник повинен ураховувати, що ресурс не завжди може бути доступний. Планувальник може бути об'єднаний з механізмом обліку репутації або заохочення з метою вибору більш активних ресурсів з точки зору їх надійності під час виконання розподілених задач. [4, 7].

– *Адаптація*. Планувальник повинен враховувати зміни характеристик ресурсів (затримка, надійність, завантаження, пропускна здатність) під час виконання розподілених завдань. Планувальник мобільних *GRID* повинен бути динамічним й адаптивним. Інакше

кажучи, планувальник повинен змінювати алгоритм планування з урахуванням змін мобільного середовища.

– *Відмовостійкість*. Контролюється надійність ресурсу. Якщо вузли схильні до збоїв планувальник вимагає відмовостійкого планування, при цьому використовуються контрольні точки, перепризначення, реплікація, резервування даних, тощо. Цей параметр особливо важливий під час планування, оскільки збої приводять до затримок і блокування виконання під задач, і як слідство до повної або часткової втрати обчислень. Планувальник може бути об'єднаний з механізмом заохочення для виділення надійних ресурсів і виключення ненадійних [7, 8].

– *Різнорідність*. Під різнорідністю ресурсів мають на увазі розходження в можливостях, а саме обчислювальна потужність процесора, об’єм пам'яті, пропускна здатність, тип операційної системи, тощо. Планувальник повинен реалізовувати засоби для групування однотипних ресурсів з метою застосування різних алгоритмів планування, відмовостійкості, реплікацій, сертифікації результатів, відповідно до групової належності [1, 8].

– *Якість обслуговування*: Балансування й розподіл навантаження необхідні для ефективного використання ресурсів. Розподіл навантаження сприяє зменшенню простоїв ресурсів за допомогою розподілу робочого навантаження, у той час як балансування навантаження врівноважує навантаження на ресурси [7]. Задача планувальника перерозподілити підзадачі від сильно завантаженого вузла на менш завантажений, що взагалі сприяє підвищенню ефективності обчислень.

*Рівень планувальника*

Планувальник мобільних *GRID* повинен ураховувати наступні аспекти під час розробки й створення алгоритму планування.

– *Організація*. Планувальники за принципом організації розділяється на три типи: централізовані, розподілені та ієрархічні залежно від того, де і як приймається рішення що до планування [7]. При централізованому підході існує деякий головний вузол, що відповідальний за прийняття рішення за планування. Головний вузол повинен мати інформацію про топологію мережі, ресурси й статус виконання завдань. При розподіленому підході, рішення по плануванню приймає кожний вузол. Вузли мають часткову інформацію про ресурси й статус виконання завдань. За ієрархічного підходу рішення про планування приймається ієрархічно (наприклад, планувальником верхнього рівня й локальним планувальником нижнього рівня). Планувальник верхнього рівня розподіляє завдання серед планувальників нижнього рівня, який в свою чергу розподіляє завдання серед вузлів свого домену.

– *Режим*. Можлива реалізація двох режимів [7, 8]: режим «*pull*» – планування ініціюється ресурсом, тобто ресурс запитує завдання в серверу; режим «*push*» – планувальник збирає інформацію про ресурси й розподіляє завдання.

– *Стратегія*. Стратегія планування використається для синхронізації завдань і ресурсів [5 – 9].

– *Групування*. Використається для формування груп ресурсів або завдань.

– *Об'єкт:* Рішення про планування приймається способом, орієнтованим на додаток або на ресурс відповідно до мети планування.

– *Динамічність.* Планування поділяється на статичне й динамічне залежно від доступності інформації про процес виконання завдання та ресурси в час прийняття рішення планувальником [1, 4, 5]. У випадку статичного планування передбачається доступність інформації. Під час динамічного планування доступна лише частка інформації. Невідомо, у якому середовищі будуть виконуватися завдання. Стан середовища постійно змінюється.

– *Залежність*. Планування залежних завдань фокусується синхронізації підзадач і даних з метою мінімізації загального часу виконання. Планування незалежних завдань засновано на наданні завдань кожній машині відповідно до її можливостей, з метою завершення як можна більшої кількості завдань одночасно.

– *Кінцеві строки.* Планування, засноване на граничних строках, розподіляє завдання ресурсам тільки в тому випадку, якщо вони здатні завершити завдання на крайній термін.
– *Пріоритет*. Пріоритетне планування розглядає пріоритети завдань.
– *Опортуністичне планування*. Опортуністичне планування припускає швидке використання ресурсів у той час, коли вони простоюють.
– *Адаптивне планування*. Адаптивне планування враховує особливості що до адаптування у середовищі, що динамічно змінюється [1, 4, 5].
– *Відмовостійке планування*. Таке планування дозволяє зберегти працездатність при відмовах, а також в умовах високої швидкості переміщення вузлів.
– *Балансування навантаження*. Засновано на запозиченні та перерозподілі навантаження.

Таким чином метою планування є досягнення планувальником цілей планування. Планувальник обирає стратегії й алгоритми у відповідності з часом отримання відповіді, пропускною здатністю, крайніх строків виконання, ціною обчислення, балансування навантаження й надійність.

## Висновки

1. На підставі огляду особливостей застосування концепції *GRID* в мобільних комп'ютерних мережах та наведеної систематизації можна виділити основні складнощі з якими пов'язані мобільні *GRID* і планування в цих системах. Це адаптивність, динамічне середовище, відмови та відсутність надійності вузлів, гетерогенність терміналів, масштабуємість, відсутність централізованого управління, багатоскачкові переходи між вузлами, обмежена пропускна здатність каналів передачі.
2. Для подолання зазначених складнощів планування в мобільних *GRID* повинно реалізувати наступні можливості: об'єднання ресурсів у групи і відповідності до їх характеристик і застосування до кожної групи найбільш ефективних стратегій планування, реплікації та сертифікації, а також реалізація динамічного, адаптивного, відмовостійкого, розподіленого планування.

## Список літератури


1. *Waldburge M. Stiller B.* Toward the Mobile GRID: Service Provisioning in a Mobile Dynamic Virtual Organization // The 4th ACS/IEEE International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA-06). – Zurich, 2006. – http://www.mobileGRIDs.org/.

2. *Group-based* Resource Selection Algorithm Supporting Fault-Tolerance in Mobile GRID / S.K. Choi; I.S. Cho; K.S.Chung; B. Song; H.C.Yu // Semantics, Knowledge and GRID, Third International Conference on Volume. – 2007. – P. 426 – 429.

3. *Silber D.* The Case for eHealth // Presented at the European Commission's first high-level conference on eHealth. – 2003, Paris, France. – http://ec.europa.eu/information_society/eeurope/ehealth/.

4. *MorariuC., WaldburgerM., Stiller B.* An Integrated Accounting and Charging Architecture for Mobile GRIDs // Third International Workshop on Networks for GRID Applications. – San Jose (CA), USA, 2006. – http://www.mobileGRIDs.org/.

5. *Choi S.J., Baik M.S., Hwang C.S.* Location Management Message Delivery Protocol in Multi-region Mobile Agent Com ing Environment // The 24th International Conference on Distribution Computing Systems (ICDCS 2004). – 2004. – P. 476–483.

6. *El-Desoky A.E.; Ali H.A.; Azab A.A.* A Pure Peer-To-Peer Desktop GRID framework with efficient fault tolerance // Computer Engineering & Systems, International Conference on Volume – 2007. – P. 346 – 352.

7. *Kertesz A , Kacsuk P.* GRID Meta-Broker Architecture: Towards an Interoperable GRID Resource Brokering Service. CoreGRID Workshop on GRID Middleware in conjunction with Euro-Par 2006, Springer-Verlag LNCS. – Volume 4375. – 2007. – P. 112–115.

8. *Kertesz A., Kacsuk P., Iosup A , Epema D. H. J.* Investigating peer-to-peer meta-brokering in GRIDs CoreGRID Technical Report Number TR-0170. – 2008. – URL: http://www.coreGRID.net.

УДК 004.724.4(045)

*А.Ю. Кулаков (Национальный Технический Университет Украины «Киевский Политехнический Институт», Украина)*

# СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ДАННЫМИ В GRID-СИСТЕМАХ

*В работе предложен способ организации децентрализованной модели управления данными в GRID-системах на основе концепции P2P-систем. При этом внимание уделяется специфике требований, которые предъявляются к совместным вычислениям. Преимуществом предложенного способа является простота масштабирования и отсутствие сложных централизованных алгоритмов управления GRID-системами.*

Предпосылки к созданию информационных *GRID*-систем изначально были вызваны необходимостью обработки больших объемов данных приложениями, с которыми обычные компьютеры, суперкомпьютеры и даже кластерные системы уже не могли справиться. Новые направления в различных областях науки, таких как ядерная физика, поиск новых месторождений полезных ископаемых, а также моделирование различных устройств, предполагают использование больших объемов данных [1]. Данные о результатах исследований необходимо сохранять таким образом, чтобы последующие обработки и доступ к ним был возможен распространенными по всему миру научными сообществами.

Под вычислительной *GRID*-системой, понимается система, которая дает возможность производить расчеты над большими объемами информации, не затрагивая все остальные функции самой системы. *GRID*-система представляет собой среду, где научные сообщества могут легко распределять ресурсы между собой для совместного решения различных трудоемких и масштабных задач.

Другими словами, ресурсы *GRID*-системы позволяют создать единую виртуальную среду, которая может включать в себя географически разделенные и распределенные аппаратные ресурсы, формирующие единую область для вычислений. Важно отметить, что к таким аппаратным ресурсам предоставляется свободный доступ большому числу удаленных пользователей. В основе вычислительных *GRID*-систем лежит концепция работы компьютерных сетей и предоставления доступа к географически удаленным ресурсам.

Важно отметить, что основным преимуществом таких систем является не только возможность параллельной удаленной обработки данных, а также возможность одновременного доступа к этим ресурсам удаленных пользователей [2].

Таким образом, параллельная обработка данных дает возможность различным научным исследованиям запускаться одновременно на различных компьютерах. В результате, можно сделать вывод, что *GRID*-системы представляют собой объединенную структуру, которая дает возможность распределять ресурсы множеству удаленных пользователей с динамически изменяющимися задачами и объемами вычислений.

В работе [3] представлены основные структуры *GRID*-систем. Отмечено, что идея создания *GRID*-систем в основном направлена на обеспечение пользователей гибкой инфраструктурой, которая предоставляет возможность надежного и простого доступа к распределенным данным, управлению ресурсами и контролю доступа к ним в масштабах локальных сетей, городов или стран.

В качестве средства децентрализованного управления доступом к данным рассмотрим систему *Peer-to-Peer* (*P2P*). Система *P2P* облегчает доступ к автономным ресурсам, однако не гарантирует надежную доставку информации. Кроме того, такие системы распределяются по всей базе пользователей, формируя объединенную структуру миллионов пользователей по всему миру.

Важно отметить, что такая технология открывает новые возможности в сфере сотрудничества географически удаленных пользователей как единой группы для решения

сложных задач с использованием распределенных ресурсов. Для достижения максимальной выгоды от использования *GRID*-систем необходимо определять наиболее эффективное размещение ресурсов и грамотно организовать механизм мониторинга и управления.

В связи с этим, актуальной является проблема разработки новых подходов к решению задачи предоставления доступа к ресурсам *GRID*-системы для групп удаленных пользователей. Кроме того, актуальной задачей является разработка промежуточного звена управления *GRID*-системами для обеспечения равноправного доступа большому количеству географически удаленных пользователей к распределенным ресурсам, поддерживая при этом соответствующий уровень надежности и класс обслуживания *GRID*-систем.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать подходы *P2P*-систем, при этом учитывать специфику требований, которые предъявляются к интенсивной совместной вычислительной работе.

Большинство существующих систем управления *GRID* архитектурой имеют централизованное управление со сложным процессом настройки и обслуживания. В этом случае настройка требуемого программного обеспечения для доступа к удаленным аппаратным ресурсам сводится к сложной установке, конфигурации и последующем тестировании *GRID*-системы всеми узлами.

При создании динамической конфигурации управления *GRID*-системой обеспечивается доступ ко всем ресурсам системы, однако, создание такой конфигурации влечет за собой значительные затраты на этапе разработки системы.

Важно отметить, что при исследовании существующих инструментов управления и мониторинга *GRID*-систем наборы инструментов не обеспечивают необходимые требования предъявляемые к механизму поддержки большого числа пользователей, которые были заложены в процессе разработки системы управления [4].

Открытая архитектура обслуживания *GRID*-систем *OGSA* (*Open Grid Services Architecture*) определяет инфраструктуру, которая комбинирует и объединяет существующие *GRID* технологии с технологиями веб-служб, для создания распределенной вычислительной *GRID*-системы. В этой схеме обслуживание *GRID*-системы берет на себя веб-служба, сложность которой соответствует сложности распределенных задач решаемых системой. Простой протокол доступа к объектам *SOAP* (*Simple Object Access Protocol*) и язык описания веб-служб *WSDL* (*Web Service Definition Language*) позволяют эффективно распределять выполняемые задачи. Отметим, что протоколы *SOAP* и *WSDL* широко используются как средства для поддержки коммуникаций в распределенных средах.

Исходя из вышесказанного, предлагается использовать широко-распределяемое, платформо-независимое, децентрализованное управление данными в *GRID*-системах.

Рассмотрим адаптивную и легко-масштабируемую структуру управления данными, которая позволит пользователям динамически присоединиться и покидать *GRID*-систему. В ядро такой системы предлагается поместить аналитическую модель, которая позволит каждому участвующему узлу или ресурсу принять решение о том, кто и когда будет взаимодействовать с определенными ресурсами системы. Платформо-независимость узлов системы позволит каждому узлу контролировать и управлять его локальным пространством для хранения данных, доступом к локальным файлам и использовать сетевых ресурсов.

Данный подход основан на методе *P2P*-систем, который не требуют централизованного управления. Простота подхода облегчает создание и добавление новых узлов к системе, тем самым упрощая процесс масштабируемости системы в целом. Однако для более эффективной работы всей системы, необходимо, чтобы бы информация о ресурсах каждого из узлов собиралась в локальном окружении, а также передавалась в ядро распределения данных.

Репликация или создание локальных копий является одним из наиболее важных требований для *GRID*-систем, так как все пользователи гарантированно должны получать доступ к необходимым данным.

Механизм репликации создает копии наиболее часто используемых запросов данных, управляет их числом и расположением в многочисленных локациях, обеспечивая доступ для пользователей. Механизм репликации управляется в соответствии со стратегией оценки стоимости/выгоды, которая принимает во внимание текущие требования к данным, расположению узлов с запросами, доступности ресурсов и емкости запоминающего устройства. Существуют две главные стратегии управления репликацией:

- централизованная;
- децентрализованная.

В централизованной модели все реплики получают копию от ядра, где первоначально собраны данные, а затем реплицируемы ядром другим узлами. В децентрализованной или *P2P* модели данные могут быть первоначально сгенерированы в различных локальных окружениях и затем разделены между идентичными наборами и узлами равноправных участников, которые входят в состав *GRID*-системы. Организация и распределение данных в этой модели создают сетевую топологию.

Однако чтобы гарантировать доступ к данным с требованиями, которые предъявляются к совместным вычислениям, необходима более простая структура. В качестве такой структуры может быть принята кольцевая топология. Данная топология может быть создана и инициализирована в процессе установления соединения с несколькими соседями, имеющими наибольшую степень связности. Такую топологию можно представить в виде управляющего оверлейного подграфа графа связности всей *GRID*-системы. Этот подграф определяет пути коммуникаций, которые могут использоваться в процессе передачи по сети местонахождения данных. Оверлейный подграф работает на прикладном уровне. Важно отметить, что в таком подграфе каждый узел имеет связь с множеством других узлов, также называемых соседями. Используя структурированные оверлейные подграфы можно сформировать основу подхода к построению масштабируемой системы управления и созданию копий для *GRID*-среды.

Когда удаленному пользователю необходим доступ к данным, создается запрос, который запускает процесс поиска. Этот поиск должен достигнуть всех возможных узлов, которые хранят копию искомого набора данных. В случае, когда система обнаружит многократные копии данных, наиболее оптимальной будет считать копия, время доступа и задержка получения данных у которой минимальны.

Однако, важно заметить, что в *GRID*-системах, при динамическом изменении количества удаленных пользователей, появление новых узлы может быть упущено из виду. Таким образом, существует потребность в адаптивном подходе обнаружения местонахождения новых узлов и предоставление им доступа к данным. В качестве примера подобных процессов поиска данных для децентрализованной системы можно назвать такие: алгоритм флуда (*Flood algorithm*), протокол *Gnutella*, централизованный алгоритм, протокол *Napster*, и распределенный протокол на основе хеш-таблиц, используемый в *CAN*, *Pastry* и *Tapestry*.

Предлагается использовать комбинацию топологий деревьев и колец, для построения оверлейного подграфа и маршрутизации запросов доступа для определения местонахождения данных в *GRID*-системе. Эти структуры могут легко приспосабливаться к различной динамической топологии. Мгновенно связывающиеся деревья показали достаточную надежность в *P2P*-системах.

В качестве примера рассмотрим случай объединения удаленных пользователей в три группы узлов, при условии, что они интересуются теми же самыми данными, что и остальные присоединившиеся (рис.1). Иллюстрация также показывает создание новых связей и удаление существующих, при этом создавая новые группы.

Рассмотрим каждый из этих процессов более детально:

- **Добавления узла**. Дерево строиться, начинаясь с корневого узла (ядро). Присоединяясь к системе, новый узел добавляется через любой *GRID*-узел, и

становиться прикрепленным к нему как дочерний. Новые узлы выбираются из списка доступных узлов, используя метрику соседнего родительского узла.

- **Удаление узла**. Когда узел покидает дерево, посылается уведомляющее сообщение его родительскому узлу, а также его соседям. Родитель удаляет этот узел из списка дочерних узлов и списков соседей. Дочерние узлы удаляемого узла связываются с текущим родительским узлом и объединяются в дерево в качестве новых дочерних узлов.
- **Поиск данных**. Поиск расположения данных начинается запросом доступа к локальному узлу. Процедура поиска начинает проверять наличие данных в локальном каталоге. Если данные на найдены, то узел посылает сообщения в виде запроса родителю, а также соседним и дочерним узлам. Процесс повторяется по всему дереву, пока данные не будут найдены (рис. 2).

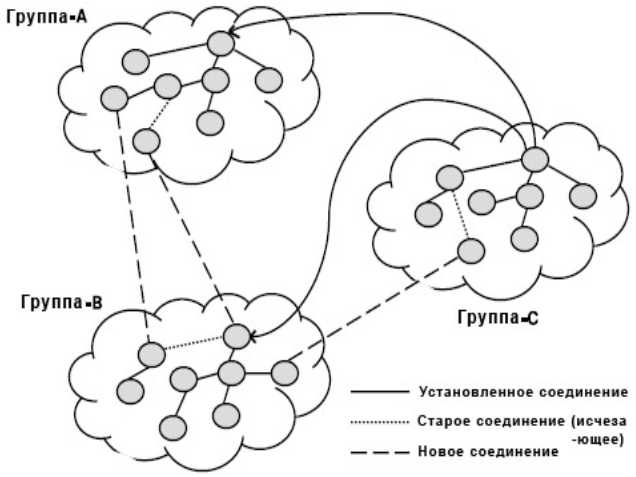



Рис. 1. Процесс поиска копий / данных

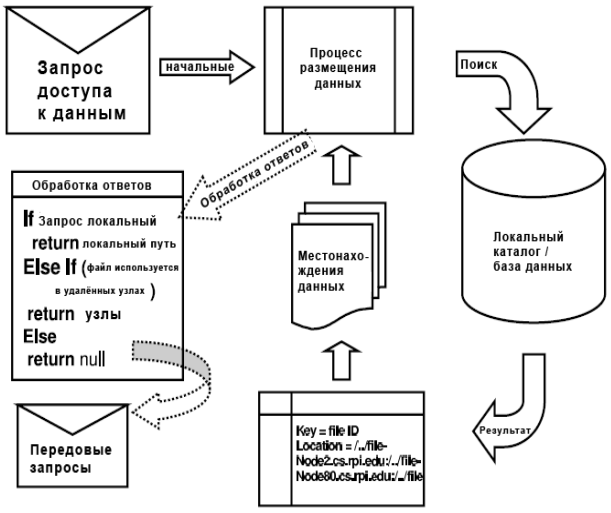



Рис. 2. Схема поиска копий / данных

Когда запрос достигает узла, который содержит необходимые данные, отправляется уведомление о найденных данных источнику поиска. После получения списка возможных расположений, источник поиска данных использует инструменты для работы с оверлейным подграфом для выбора оптимального времени доступа и задержки получения данных.

Предлагаемый способ организации децентрализованной модели управления *GRID*-системами использует метод доступа к данным основанный на концепции *P2P*-систем. При этом основным преимуществом предложенного способа можно считать простоту добавления и удаления узлов системы, а также отсутствие сложных алгоритмов управления и мониторинга *GRID*-системы.

**Список литературы:**

1. *W. Allcock, J. Bester, J. Bresnahan, A. Chervenak, I. Foster, C. Kesselman, S. Meder, V. Nefedova, D. Quesnel, and S. Tuecke.* Secure, efficient data transport and replica management for high-performance data-intensive computing. In IEEE Mass Storage Conference, 2001.

2. *W. Allcock, A. Chervenak, I. Foster, C. Kesselman, C. Salisbury, and S. Tuecke.* The data grid: Towards an architecture for the distributed management and analysis of large scientific datasets. Journal of Network and Computer Applications, 23:187–200, 2001.

3. *I. Foster and C. Kesselman.* The Grid: Blueprint for a New Computing Infrastructure. Morgan Kaufman Publishers Inc., 1999.

4. *A. Rowstron and P. Druschel.* Pastry: Scalable, decentralized object location and routing for large-scale peer-to-peer systems. In Proc. of the 18th IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms, Heidelberg, Germany, November 2001

УДК 681.51

*А.Е. Литвиненко, доктор технических наук*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# АНАЛИЗ ПОДМНОЖЕСТВ ВАРИАНТОВ РЕШЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ КОМБИНАТОРНЫХ ЗАДАЧ

*Сформулированы свойства подмножеств вариантов решения экстремальных комбинаторных задач. Выведены математические соотношения, лежащие в основе формальной процедуры анализа подмножеств вариантов. Описаны операции, реализуемые в зависимости от результатов анализа подмножеств вариантов с целью сокращения объема вычислений и повышения скорости сходимости комбинаторных алгоритмов.*

В практике управления экономическими, производственными и технологическими процессами часто встречаются задачи, математическое решение которых может быть представлено вектором значений булевых переменных (решение типа «да–нет»). Эти задачи всегда многовариантны и, следовательно, носят оптимизационный характер. Поэтому они получили название экстремальных комбинаторных задач. К числу наиболее известных представителей данного класса относятся задачи распределения-упорядочения работ, являющиеся предметом исследований теории расписаний; принятия оперативных решений в нештатных ситуациях; проектирования сложных объектов, в том числе компьютерных систем и сетей; маршрутизации транспортных, информационных и прочих потоков; размещения производственных ресурсов и капиталовложений; планирования инвестиционной деятельности и др.

Доказано, что экстремальные комбинаторные задачи относятся к числу так называемых NP-полных задач, для которых характерна неполиномиальная (в большинстве случаев – экспоненциальная) зависимость продолжительности решения задачи от ее размерности. Такие задачи считаются «труднорешаемыми» с вычислительной точки зрения, то есть не поддающимися эффективному алгоритмическому решению [1].

Для решения подобных задач разработан метод, реализующий известную идею ветвей и границ и получивший название метода направленного перебора вариантов [2]. Он предусматривает последовательное дробление множества $G$ вариантов решения задачи, производимое до тех пор, пока не устанавливается оптимальный план или факт несовместности системы ограничений. Дробление подмножеств вариантов осуществляется путем фиксации значений той или иной переменной. При этом критерий выбора подмножества вариантов для дальнейшего разбиения формулируется таким образом, чтобы сократить количество шагов алгоритма, приводящих к искомому результату.

Многочисленные вычислительные эксперименты доказали достаточную эффективность алгоритмов, реализующих стратегию направленного перебора. Однако ее можно значительно повысить за счет применения к новым подмножествам вариантов, получаемым в результате разбиения множества $G$ или его частей, процедуры углубленного формального анализа, реализуемой с целью выявления:

– подмножеств, не содержащих допустимые планы;

– ограничений, переставших быть активными по отношению к планам анализируемого подмножества вариантов;

– безальтернативных переменных, для которых существуют единственные допустимые значения.

Результаты анализа дают основание для выполнения следующих операций, способствующих максимальному сокращению объема информации, обрабатываемой на каждом этапе решения задачи, и ускорению получения искомого результата без дальнейших разбиений подмножеств вариантов:

– подмножества, не содержащие допустимые планы, исключаются из дальнейшего рассмотрения;

– ограничения, переставшие быть активными по отношению к планам анализируемого подмножества вариантов, исключаются из системы ограничений, соответствующей данному подмножеству;

– безальтернативным переменным присваиваются единственные допустимые значения.

Экстремальные комбинаторные задачи в общем случае формулируются следующим образом: максимизировать целевую (критериальную) функцию $f(x)$ при соблюдении системы ограничений

$$g_j(x) = \sum_{r \in R_j} a_{jr} \varphi_r(x) \le b_j \; ; \; j = \overline{1,n} \, , \tag{1}$$

где $x$ – вектор независимых булевых переменных: $x = (x_i; i = \overline{1,m})$ ; $x_i \in \{0,1\}$, $i = \overline{1,m}$ ;

$\varphi_r(x)$ – $r$-е произведение независимых переменных ($x$-произведение);

$R_j$ – множество номеров $x$-произведений, входящих в $j$-е ограничение; $j = \overline{1,n}$ **;**

$a_{jr}$ и $b_j$ – действительные числа, выступающие в качестве коэффициентов ($a_{jr}$) и свободных членов ($b_j$) $j$-го ограничения; $j = \overline{1,n}$ .

Другими словами, необходимо найти такой вектор значений булевых переменных $x = (x_i; i = \overline{1,m})$, который при условии удовлетворения всем неравенствам системы (1) обращает в максимум функцию $f(x)$ .

Пусть к началу некоторого этапа решения задачи в полном множестве $G$ вариантов выделены $\lambda$ непересекающихся подмножеств $G_k$, содержащих допустимые планы; $k = \overline{1,\lambda}$ .

Пусть $I_k^0$ и $I_k^1$ – множества номеров независимых переменных, получивших в планах $k$-го подмножества вариантов значения 0 и 1, соответственно, а $I_k$ – совокупность номеров переменных, значения которых в $G_k$ не зафиксированы.

Набор значений переменных $x_i$, $i \in I_k^0 \bigcup I_k^1$, такой что

$$(\forall i \in I_k^0)(x_i = 0) \,\&\, (\forall i \in I_k^1)(x_i = 1) \, ,$$

называется частичным планом $k$-го подмножества вариантов.

Каждому из подмножеств $G_k$, $1 \le k \le \lambda$, соответствует собственная система ограничений, полученная из исходной системы (1) в результате подстановки частичного плана:

$$g_{jk}(x) = \sum_{r \in R_{jk}} a_{jr} \cdot \varphi_{rk}(x) \le b_{jk} \; ; \;\; j \in J_k ; \;\; x_i \in \{0,1\} ; \;\; i \in I_k \, , \tag{2}$$

где $J_k$ – множество номеров ограничений, активных по отношению к планам $k$-го подмножества вариантов;

$\varphi_{rk}(x)$ – функция независимых переменных, представляющая собой произведение аргументов функции $\varphi_r(x)$, которые в планах $k$-го подмножества вариантов не имеют фиксированных значений;

$R_{jk}$ – совокупность номеров $x$-произведений, входящих в $j$-е ограничение и не обращаемых частичным планом подмножества $G_k$ в константу;

$b_{jk}$ – свободный член $j$-го ограничения системы (1), уменьшенный на сумму коэффициентов, с которыми в это ограничение входили $x$-произведения, обращенные частичным планом подмножества $G_k$ в единицу.

Свойства подмножества вариантов решения задачи определяются свойствами неравенств, входящих в соответствующую этому подмножеству систему ограничений.

Укрупнено свойства *k*-го подмножества вариантов можно сформулировать в виде трёх следующих высказываний:

1. Если выполняется условие

$$\min_{x\in G_k} g_{jk}(x) > b_{jk};\ \ j \in J_k, \tag{3}$$

то $j$-у ограничению системы (2) не удовлетворяет ни один из планов подмножества $G_k$. Следовательно, данное подмножество не содержит допустимых планов.

2. Если выполняется условие

$$\max_{x\in G_k} g_{jk}(x) \le b_{jk};\ \ j \in J_k, \tag{4}$$

то $j$-у ограничению системы (2) удовлетворяет любой из планов подмножества $G_k$. Следовательно, это ограничение не является активным по отношению к планам данного подмножества вариантов и может не учитываться при исследовании $G_k$.

3. Если для некоторого подмножества $G'_k \subset G_k$ выполняется условие

$$\min_{x\in G_k} g_{\mathrm{jk}}(x) \le b_{jk} < \min_{x\in G'_k} g_{jk}(x);\ \ j \in J_k, \tag{5}$$

то из всех планов подмножества $G_k$ $j$-у ограничению системы (2) могут удовлетворять лишь те, которые принадлежат совокупности $G''_k = G_k \setminus G'_k$.

В этом случае подмножество $G_k$ целесообразно заменить имеющим меньшую мощность подмножеством $G''_k$ вариантов решения задачи. Если подмножество $G''_k$ может быть выделено в $G_k$ путём фиксации значений некоторых из переменных $x_i, i \in I_k$, то эти значения целесообразно присоединить к частичному плану подмножества $G_k$.

Вычисление предельных значений функции $g_{jk}(x)$ на подмножестве $G_k$ (или $G'_k$) вариантов в общем случае эквивалентно установлению дополняющих планов этого подмножества, обращающих $g_{jk}(x)$ в минимум и максимум. Решение подобных задач не представляет принципиальных трудностей, но требует определённых затрат машинного времени. Поэтому при исследовании свойств *k*-го подмножества вариантов правую часть $b_{jk}$ *j*-го ограничения системы (2) целесообразно сравнивать не с точными предельными значениями функции $g_{jk}(x)$, а с достаточно близкими к ним значениями величин, вычисление которых не требует реализации оптимизационной процедуры.

Пусть $R^2_{jk}$ и $R^3_{jk}$ – совокупности номеров $x$-произведений, входящих в *j*-е ограничение системы (2) с отрицательными и положительными коэффициентами соответственно:

$$R^2_{jk} = \{r \in R_{jk} : a_{jr} < 0\},\ \ R^3_{jk} = \{r \in R_{jk} : a_{jr} > 0\}.$$

Тогда при установлении факта наличия (или отсутствия) допустимых планов в подмножестве $G_k$ величину $b_{jk}$ целесообразно сравнивать с суммой $s^{(2)}_{jk}$ отрицательных коэффициентов функции $g_{jk}(x)$. Корректность заключений, выводимых на основе этого сравнения, будет соблюдена, поскольку в любом случае справедливо неравенство

$$s^{(2)}_{jk} \le \min_{x\in G_k} g_{jk}(x);\ \ j \in J_k,$$

и, следовательно, условие (3) выполняется всякий раз, когда $s^{(2)}_{jk} > b_{jk};\ \ j \in J_k$.

Это исключает возможность «потери» допустимых решений экстремальной комбинаторной задачи.

При выявлении ограничений, переставших быть активными для планов подмножества $G_k$, правую часть *j*-го ограничения системы (2) можно сравнивать с суммой $s^{(3)}_{jk}$ положительных коэффициентов функции $g_{jk}(x)$. Корректность последующих выводов обусловливается тем, что в любом случае справедливо неравенство

$$s_{jk}^{(3)} \geq \max_{x \in G_k} g_{jk}(x);\ \ j \in J_k,$$

и, следовательно, условие (4) выполняется всякий раз, когда $s_{jk}^{(3)} \leq b_{jk};\ \ j \in J_k$.

Это делает невозможным исключение из системы (4) активных ограничений.

Пусть $I_{jk}$ – множество номеров независимых переменных, входящих в $j$-е ограничение системы (2).

Выделение в $G_k$ какого-либо подмножества $G_k' \subset G_k$ вариантов решения задачи формально осуществляется путём задания дополнительных математических соотношений, которым должны удовлетворять планы выделяемого подмножества. В отдельных случаях такие соотношения могут определять конкретные значения некоторых переменных из множества $\{x_i;\ i \in I_{jk}\};\ \ j \in J_k$. Присоединение этих значений к частичному плану подмножества $G_k$ приводит к образованию частичного плана выделяемого подмножества вариантов $G_k'$.

При исследовании свойств $j$-го ограничения системы (2) подмножество $G_k'$ выделяется путём наложения на планы $k$-го подмножества вариантов одного из следующих дополнительных соотношений:

$$\text{a)}\ \varphi_{r'k}(x) = 0,\ \text{где}\ r' \in R_{jk}^2;\quad \text{b)}\ \varphi_{r''k}(x) = 1,\ \text{где}\ r'' \in R_{jk}^3;\ \ j \in J_k.$$

Тогда для установления факта наличия (или отсутствия) допустимых планов в подмножестве $G_k'$ свободный член $b_{jk}$ целесообразно сравнивать с величинами $(s_{jk}^{(2)} - a_{jr'})$ или $(s_{jk}^{(2)} + a_{jr''})$ соответственно. Корректность формулируемых при этом выводов гарантируется тем, что ни одна из этих величин не может превышать минимального значения функции $g_{jk}(x)$ на множестве планов $G_k'$:

$$s_{jk}^{(2)} - a_{jr'} \leq \min_{x \in G_k'} g_{jk}(x);\ \ s_{jk}^{(2)} + a_{jr''} \leq \min_{x \in G_k'} g_{jk}(x);\ \ r' \in R_{jk}^2; r'' \in R_{jk}^3; j \in J_k.$$

Следовательно, условие (5) будет выполняться всякий раз, когда справедливы неравенства:

$$s_{jk}^{(2)} \leq b_{jk} < s_{jk}^{(2)} - a_{jr'}$$

или

$$s_{jk}^{(2)} \leq b_{jk} < s_{jk}^{(2)} + a_{jr''};\quad r' \in R_{jk}^2;\quad r'' \in R_{jk}^3;\quad j \in J_k.$$

Это исключает возможность ошибочного отсечения от $G_k$ такого подмножества $G_k'$, которое содержит допустимые планы.

Процедура анализа $k$-го подмножества вариантов решения задачи заключается в поочередной проверке выполнения условий каждого из сформулированных утверждений для всех ограничений системы (2). В зависимости от результатов этой проверки в цикле анализа осуществляется та или иная последовательность упомянутых выше действий.

## Выводы

Вычислительные эксперименты показали, что реализация процедуры углубленного формального анализа подмножеств вариантов при решении экстремальных комбинаторных задач влечет за собой, в среднем, 3,5-кратное уменьшение количества шагов алгоритма, приводящих в искомому результату.

## Список литературы

1. *Пападимитриу Х., Стайглиц К.* Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. – М.: Мир, 1985. – 512 с.

2. *Литвиненко А.Е.* Метод направленного перебора в системах управления и диагностирования. – К.: Наук.-вид. центр НБУВ, 2007. – 328 с.

УДК 004.42 (0412.3)

*М.Г. Луцький, кандидат технічних наук,*
*В.А. Хоменко, кандидат технічних наук,*
*Є.М. Сидоров, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ЗАСОБИ ЗВОРОТНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВІАЦІЙНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-МОДЕЛЮЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ

*Особливості технічного забезпечення авіаційних інформаційно-моделюючих комплексів потребують застосування в зворотної інженері не тільки засобів для досліджень програмного забезпечення, але і для досліджень технічного обладнання. В статті пропонуються програмні засоби для досліджень технічного обладнання, розглядаються загальні схеми побудови засобів зворотної інженерії, та їх застосування на прикладі реінженерії програмного забезпечення авіаційного тренажеру.*

## Вступ

Авіаційні інформаційно-моделюючи комплекси, це об'єкти, які містять значну кількість різноманітного обладнання, що працює під управлінням обчислювальних систем [1]. Коли постає задача підтримки працездатності таких комплексів застосовується реінженерія програмного забезпечення [2], яка для цих комплексів на відміну від інших має певні особливості [3]. Їх сутність полягає в виконанні при зворотної інженерії досліджень не тільки успадкованого програмного забезпечення, але і технічного обладнання. В зв'язку з цим, для виконання зворотної інженерії, як складової реінженерії необхідно розглядати два типи засобів. Перші, застосовуються традиційно, для дослідження успадкованого програмного забезпечення [4], а другі, нові засоби, для досліджень технічного обладнання, пропонуються в статті. Результати обох досліджень, використовують для налагодження відновленого програмного забезпечення, або для реалізації того програмного забезпечення, що розробляється заново [5].

В статті розглядаються загальні схеми вказаних засобів. На прикладі реінженерії програмного забезпечення тренажера ТЛ-410М демонструється застосування схем.

## 1. Загальні схеми засобів зворотної інженерії

Засоби досліджень складаються з інструментів відновлення інформації про програмне забезпечення та технічне обладнання.

Засоби відновлення інформації про програмне забезпечення – інструменти зворотної інженерії, які призначені для аналізу початкового коду на мові успадкованого програмного забезпечення і побудови його високорівневого алгоритмічного уявлення. Звичайно, ці засоби будуються на основі широко відомої схеми, яка містить компоненти призначені для здобування відповідної інформацію з похідного коду, та компонентів, які на основі цієї інформації будують представлення знань о програмі на різних рівнях абстрагування [4].

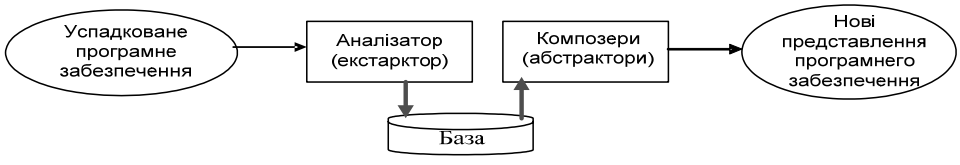
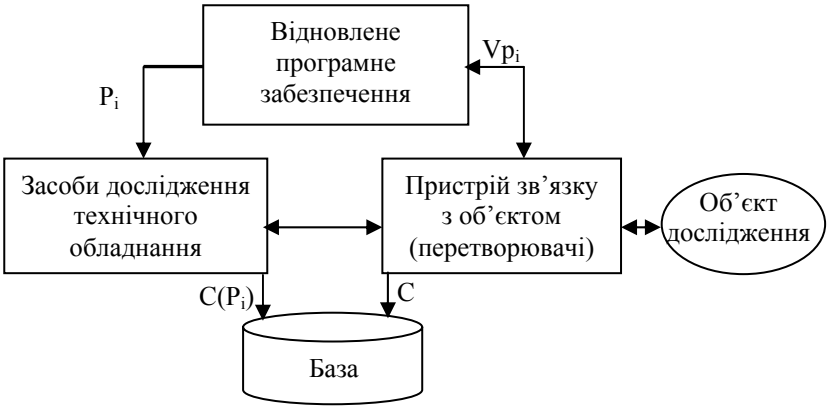



Рис. 1 Схема засобів дослідження програмного забезпечення

Засоби відновлення інформації про технічне обладнання – це інструменти зворотної інженерії, які призначені для дослідження технічного обладнання, з метою узгодження параметрів, значення яких виробляє відновлене програмне забезпечення і характеристик відповідного технічного обладнання комплексу. Засоби забезпечують дослідження різноманітного обладнання комплексу і містять компоненти, що можна поділити на дві групи. В першу, входять засоби досліджень індикаторів, а в другу – датчиків.




Зараз, в якості цих засобів використовують відповідні технічні прилади, а тому побудова характеристик обладнання здійснюються вручну.

Рис. 2 Схема застосувань засобів дослідження технічного обладнання

Пропонується програмні засоби, які автоматизують не тільки дослідження, але і обробку результатів (рис. 2).

Для реалізації дослідження пропонується використовувати спеціальний набір інструментів, який складається з вимірнику сигналів і генератору тестових сигналів.

Вимірник сигналів призначений для зняття характеристик органів управління і датчиків, та забезпечує набуття цифрових значень сигналів (D), нормованих значень параметрів (P), відповідних значень напруги (U), а також візуалізацію значень і графіків (рис. 3).

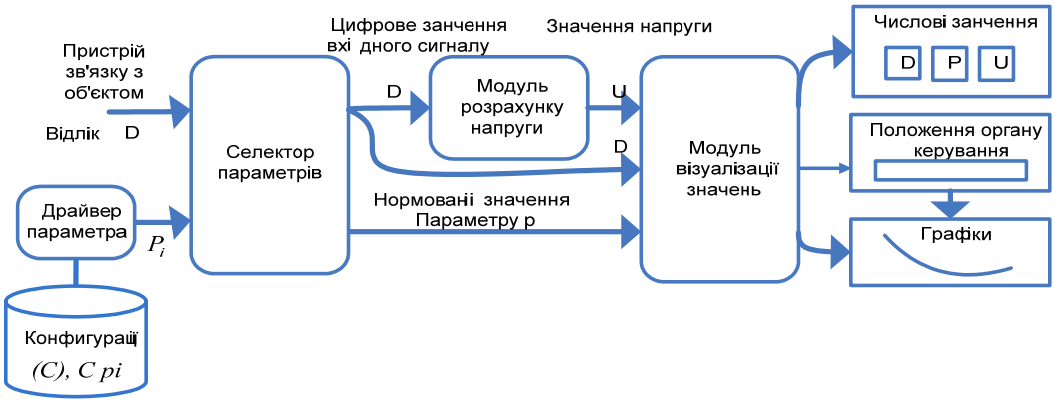



Рис. 3 Структура програмного забезпечення вимірника сигналів

Селектор параметрів забезпечує вибір перетворювача і каналу, через який в обчислювальну систему поступають значення сигналу органу управління. Цифрові значення відліків (D) знімаються з перетворювачів, а нормовані значення параметра обчислюються – $P_i = f_p(D, C_{pi})$, де $C_{pi}$ – конфігурація параметрів. Цифрові значення відліків (D) перетворюються в значення напруги (U), приведені до входу перетворювача, з використанням даних конфігурації відповідного пристрою введення-виводу (C) – $U = f_u(D, C)$. Модуль візуалізації значень забезпечує виведення значень сигналу, що знімається з органу управління в вигляді цифрових значень відліків (D), нормованих значень параметра (P) і значень напруги (U). Інструмент будує характеристики органу управління шляхом відслідкування послідовної дискретної зміни його положення, а також графічно відображає зміну значень D, $P_i$ , U в часі.

Генератор тестових сигналів виробляє і подає тестові сигнали на індикаторні прилади і виконавчі пристрої (рис. 4). Передбачено можливість задати для управління виходом пристрою будь-який з трьох типів значень - D, P, U. Значення, що вводяться через селектор подаються на безпосередньо в драйвер пристрою, або параметрів, відповідно. Значення напруги подаються – через модуль перерахунку напруги.

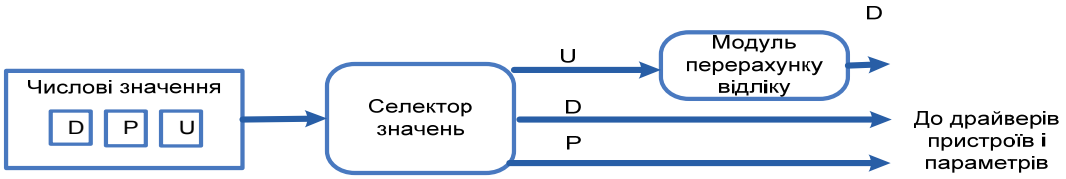



Рис. 4 Структура програмного забезпечення генератора тестових сигналів

## 2. Реалізація і застосування засобів, на прикладі авіаційного тренажеру

Реалізація засобів здійснювалася в процесі відновлення працездатності авіаційного тренажеру ТЛ-410М для реінженерії його програмного забезпечення [1].

Засіб відновлення інформації про програмне забезпечення, згідно загальної схеми (рис. 1) було розроблено таким, що він складається з графічного інтерфейсу і ядра, яке містить два компоненти - екстрактор та абстрактор (рис. 5).

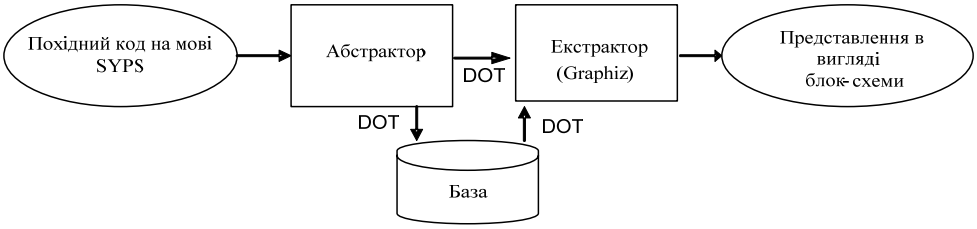



Рис. 5 Схема засобів дослідження програмного забезпечення

Початковий код в автокоді SYPS транслюється в текст на проміжній мові DOT [6], який графічним модулем Graphiz [6] перетворюється в графічне представлення алгоритму початкового коду (блок-схему) у вигляді *.gif файлу. Інтерфейс відображує блок-схему користувачеві (рис. 6).

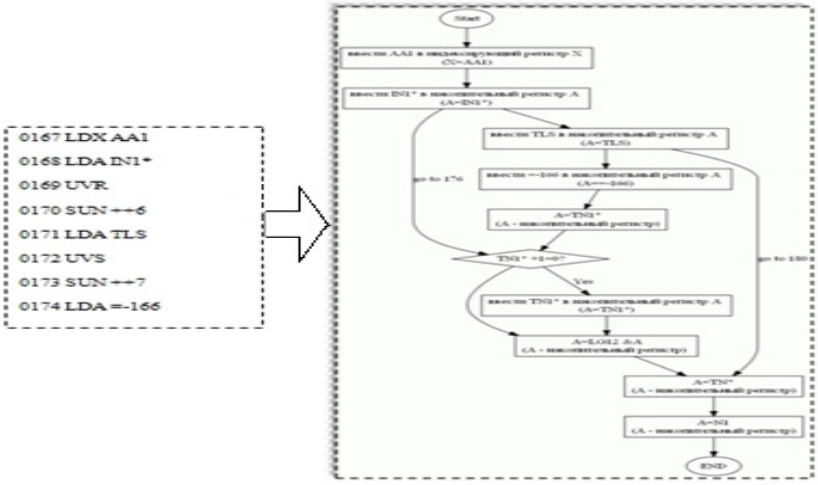



Рис. 6 Приклад результатів роботи засобу

Функціонування реалізованого засобу дослідження технічного обладнання демонструється на прикладі з'ясування характеристик рукояті керування двигуном авіаційного тренажеру ТЛ-410М. На рис. 7 наведено результати дослідження. Відхилення рукояті від нейтральної позиції надано у відсотках від максимального переднього та заднього положень (реверс). Діапазону (-0,87..0,87) нормованих значень параметру „RUD DEPP" тренажеру відповідає змінення напруги потенціометру рукояті в діапазоні (-4,85..5,1) з відносно лінійною характеристикою. На підставі цих результатів сформована наступна конфігурація пристрою зв'язку з об'єктом для цього параметру: характеристика – лінійна; $P_{\min} = -0{,}87$, $P_{\max} = 0{,}87$, $U_{\min} = 4{,}85$, $U_{\max} = 5{,}1$.

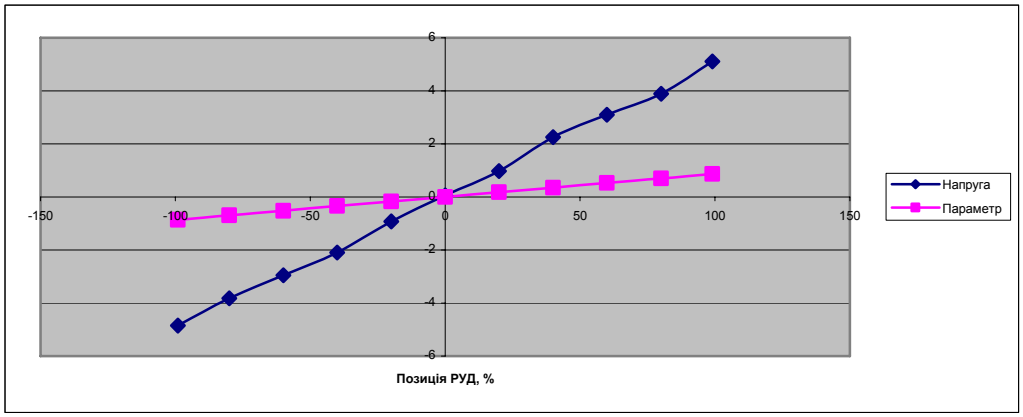



Рис. 7 Характеристика рукояті керування двигуном тренажера

**Заключення**

Дослідження технічного обладнання при реінженерії програмного забезпечення складних інформаційно-моделюючих комплексів важливі не менше досліджень програмного забезпечення. Програмно реалізуємі засоби таких досліджень дозволяють автоматизувати процеси зворотної інженерії і підвищити ефективність реінженерії в цілому.

В статті розглянуто засоби досліджень, які пропонуються застосовувати при зворотної інженерії програмного забезпечення авіаційних інформаційно-моделюючих комплексів. Вперше запропоновано схеми реалізації програмних засобів для дослідження технічного обладнання комплексів.

**Список літератури**

1. *Сидоров Н.*А., *Недоводеев В.Т., Хоменко В.А.и др.* Реинженерия наследуемого программного обеспечения информационно-моделирующих тренажерных комплексов // Управляющие системы и машины.- №4.- 2008.- С. 68-74.

2. *Луцький М.Г., Сидоров М.О., Зіатдінов Ю.К.*. Підтримка придатності інформаційно-програмного забезпечення авіаційної техніки // Матер. Наук. - практ. Конф. «Актуальні проблеми розвитку авіаційної техніки». - М.Київ.- 2009 р.- с. 75.

3. *Rugaber S., Stivewalt K.* Model-Driven Reverse Engineering.- IEEE Software.- July.- 2004.- p. 45-52.

4. *Chikofsky E.J., Gross J.H.* Reverse Engineering and Design Recovery: Taxonomy // IEEE Software.- Jan. 1990.- P. 13-17.

5. *Хоменко В.А,* Сидоров Е.Н., Мендзебровский И.Б.. Шаблон програмного обеспечения устройств связи с объектом авиационных тренажеров // Проблеми програмування; НАН України.- 2008.- №2, - 3.- С. 239-249.

6. *E.R. Ganser, S. C. North.* An open graph visualization system amd its applications to software engineering//Software Practice and Experiments, v1.- 1999.- p 1-5.

УДК: 004.056.5:519.17

*О.П. Мартынова, кандидат технических наук*
*(Национальный авиационный университет, Украина),*
*В.Л. Баранов, доктор технических наук*
*(Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины, Украина)*

# МЕТОДЫ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ И МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЯХ

*Предложены методы иерархической многокритериальной и многопутевой маршрутизации в компьютерных сетях с целью повышения качества их обслуживания и уровня их защищенности.*

Развитие компьютерных сетей и информационных технологий требует комплексного решения задачи повышения эффективности передачи информации, совместно с решением задачи защиты передаваемой информации. Необходимость обеспечения информационной безопасности пользователей компьютерных сетей вызвана широким использованием их в государственных и финансовых организациях, в промышленных предприятиях и в организациях оборонного комплекса. Перспективным является направление повышения уровня защищенности компьютерных сетей, которое связано с совершенствованием методов маршрутизации передачи информации в сетях с учетом рисков потери информации, ее модификации и воздействий внешних факторов на каналы передачи информации.

Анализ последних исследований и публикаций [1] позволяет сделать вывод о том, что повышение уровня защищенности компьютерных сетей можно достичь методом многокритериальной маршрутизации, который позволяет учесть качество обслуживания и информационную безопасность пользователей компьютерных сетей. Недостаток предложенного в работе [1] метода многокритериальной маршрутизации заключается в выборе единственного маршрута, который соответствует Парето-оптимальному решению по нескольким критериям качества.

Цель работы заключается в разработке методов иерархической и многопутевой многокритериальной маршрутизации компьютерных сетей.

Реализация многокритериальной маршрутизации совместно с поиском нескольких независимых альтернативных маршрутов позволяет увеличить допустимую нагрузку в сети, увеличить надежность передачи данных и снизить риски потери информации или ее модификации. Снижение рисков потери информации или ее модификации связано с распространением ограниченных ресурсов несанкционированного доступа по нескольким каналам передачи информации при реализации многопутевой маршрутизации.

Основная идея методов иерархической многокритериальной и многопутевой маршрутизации заключается в двухэтапном решении задачи повышения уровня защищенности пользователей компьютерной сети. На первом этапе информационная безопасность повышается методом иерархической многокритериальной маршрутизации, который учитывает критерии качества передачи информации совместно с критериями защищенности передаваемой информации от несанкционированного доступа. На втором этапе реализуется многопутевая маршрутизация среди всех многокритериальных маршрутов, имеющих наиболее близкие оценки по величине скалярной свертки нескольких критериев качества передачи информации и уровня ее защищенности.

Реализацию этих методов маршрутизации опишем на математической модели компьютерной сети в виде графа, вершины которого моделируют узлы-источники и узлы-приемники информации, а ветви графа соответствуют каналам передачи информации.

На первом этапе сформулируем задачу многокритериальной маршрутизации на графе между узлом-источником и узлом-приемником информации.

Введем систему частных критериев качества, которая, с одной стороны, характеризует качество передачи информации от узла-источника к узлу-приемнику, а с другой стороны, характеризуют уровень защищенности предаваемой информации от несанкционированного доступа. Предположим, что скорость передачи данных оценивается частным критерием качества $I_1^*$, время задержки передачи данных задается частным критерием качества $I_2^*$, надежность передачи информации учитывается частным критерием качества $I_3^*$, риск потери информации или ее модификации оценим частным критерием качества $I_4^*$ и т.д. В этой системе частных критериев качества $I_1^*$ и $I_2^*$ оценивают технические характеристики канала передачи информации. Частный критерий качества $I_3^*$ оценивает надежность передачи информации в условиях действия внутренних и внешних помех. Уровень защищенности канала передачи данных характеризуется риском $I_4^*$ потери информации или ее модификации в процессе передачи данных. В рассматриваемой системе частных критериев качества частные критерии качества $I_1^*$, $I_2^*$, $I_4^*$ необходимо минимизировать, а частный критерий качества $I_3^*$ следует максимизировать. Приведем все частные критерии качества к случаю их минимизации. С этой целью максимизируемый частный критерий качества $I_3^*$ заменим на минимизируемый частный критерий качества $I_3 = I_{3m} - I_3^*$, где $I_{3m}^*$ – максимально-возможное значение надежности, которое задается техническими характеристиками канала передачи данных.

В общем случае считаем, что качество обслуживания и уровень информационной безопасности пользователя оценивается $n$ минимизируемыми критериями качества $I_1, I_2, ..., I_n$. На основании технических характеристик каналов передачи информации, требований к качеству обслуживания и уровню информационной безопасности задаются предельно-допустимые значения частных критериев качества $I_{1m}, I_{2m}, ..., I_{nm}$. Затем переходим к системе относительных частных критериев качества $I_1/I_{1m}, I_2/I_{2m}, ..., I_n/I_{nm}$, диапазон изменения которых задаются ограничениями:

$$0 \le \frac{I_i}{I_{im}} \le 1,\ i = \overline{1,n}. \qquad (1)$$

Известно, что задача многокритериальной оптимизации является некорректной, так как частные критерии качества конфликтуют между собой. Улучшение одного частного критерия качества ухудшает один или несколько других частных критериев качества. Регуляризация некорректной задачи многокритериальной оптимизации выполним скалярной сверткой частных критериев качества по нелинейной схеме компромиссов [2]:

$$J = \sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_i}{1 - \frac{I_i}{I_{im}}},\ \alpha_i \ge 0,\ \sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1, \qquad (2)$$

где $I_i$ – $i$-й частный критерий качества, $\alpha_i$ – весовые коэффициенты, $I_{im}$ – предельно-допустимое значение частного критерия качества $I_i$.

Предлагается присваивать ветвям графа вес (длину) пропорциональный скалярной величине $J$, которая определяется по нелинейной схеме компромиссов (2).

Математическая модель компьютерной сети в виде графа, веса (длина) ветвей которого рассчитываются по выражению (2) позволяет реализовать многокритериальную оптимизацию маршрутов передачи информации от узла-источника к узлу-приемнику путем минимизации критерия качества:

$$\min_j L = \sum_{j=1}^{r}\sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_{ij}}{1-\frac{I_{ij}}{I_{ijm}}}, \alpha_{ij} \geq 0, \sum_{i=1}^{n} \alpha_{ij} = 1, \quad (3)$$

где $I_{ij}$ – *i*-й частный критерий качества в *j*-й ветви графа; $I_{ijm}$ – предельно-допустимое значение *i*-го частного критерия качества в *j*-й ветви графа; $\alpha_{ij}$ – весовые коэффициенты; *n* – количество частных критериев качества; *r* – количество ветвей графа вдоль маршрута от узла-источника к узлу-приемнику.

Весовые коэффициенты $\alpha_{ij}$ в (3) позволяют задать приоритет тех каналов передачи информации, которые имеют больший уровень защищенности информации, чем другие. Весовые коэффициенты $\alpha_{ij}$ также дают возможность повысить уровень информационной безопасности за счет уступок в качестве обслуживания компьютерной сети.

Задача минимизации критерия качества (3) известна как задача о кратчайшем пути между узлом-источником и узлом-приемником. Следовательно, применение для расчета весов графа математической модели компьютерной сети свертки по нелинейной схеме компромиссов (3) сводит задачу многокритериальной маршрутизации к известной задачи о кратчайшем пути, которая может быть решена алгоритмом Дейкстры либо параллельными средствами маршрутизации [3].

Свертка частных критериев качества по нелинейной схеме компромиссов (3) в случае значительного количества частных критериев качества и их равнозначности задает весовые коэффициенты в виде $\alpha_{ij} = 1/n$. Выбор весовых коэффициентов в таком виде приводит к уменьшению влияния изменения любого частного критерия качества на общий интегральной критерий качества (3) в случае роста количества частных критериев качества. Проблему снижения чувствительности общего интегрального критерия качества (3) решим методом иерархической многокритериальной оптимизации на основании вложенных скалярных сверток по нелинейным схемам компромиссов [4]. Метод основан на формировании из системы *n* частных критериев качества (1) многоуровневой иерархической структуры в виде пирамиды, в основание которой лежит система *n* частных критериев качества, каждый *S*+1-й уровень пирамиды формируется из частных критериев качества нижнего *S*-го уровня пирамиды, а вершина пирамиды определяет иерархический общий скалярный критерий качества. На каждом *S*-м уровне пирамиды все частные критерии качества разбиваем на *K* групп, по $n_k^{(s)}$ частных критериев качества в каждой группе. Скалярная свертка $n_k^{(s)}$ частных критериев выполняется по нелинейной схеме компромиссов (2) согласно выражению:

$$I_K^{(S+1)} = \sum_{i=1}^{n_R^{(S)}} \frac{\alpha_{ik}^{(s)}}{1-\frac{I_{ik}^{(s)}}{I_{ikm}^{(s)}}}, \alpha_{ik}^{(s)} \geq 0, \sum_{i=1}^{n_k^{(s)}} \alpha_{ik}^{(s)} = 1, \quad (4)$$

где $\alpha_{ik}^{(s)}$ – весовые коэффициенты;

$I_{ik}^{(s)}$ – *i*-й частный критерий качества на *S*-м уровне в *K*-й группе;

$I_{ikm}^{(s)}$ – предельно-допустимые значения *i*-го частного критерия качества на *S*-м уровне в *K*-й группе:

$$0 \leq I_{ik}^{(s)} \leq I_{ikm}^{(s)}, i = \overline{1, n_k^{(s)}}. \quad (5)$$

Предположим, что пирамида частных критериев качества содержит *S* уровней. Тогда вершину пирамиды образует иерархический общий критерий качества $I^{(s+1)}$. Согласно методу иерархической многокритериальной маршрутизации предлагается присваивать ветвям графа, моделирующего компьютерную сеть, вес (длину) пропорциональный скалярной величине иерархического общего критерия качества $I^{(s+1)}$ формируемого в

вершине пирамиды частных критериев качества (4), (5). Такая математическая модель компьютерной сети позволяет реализовать иерархическую многокритериальную оптимизацию маршрутов передачи информации от узла-источника к узлу-приёмнику путём минимизации длины маршрута

$$\min_j L = \sum_{j=1}^{r} I_{j0}^{(s+1)}, \tag{6}$$

где $I_{j0}^{(s+1)}$ – иерархический общий критерий качества $j$-й ветви графа,

$r$ – количество ветвей графа вдоль маршрута от узла-источника к узлу-приёмнику.

Применение метода вложенных скалярных сверток по нелинейным схемам компромиссов (4), (5) встречает затруднения связанные с выбором предельно-допустимых значений частных критериев качествах $I_{ikm}^{(s)}$ на всех уровнях, кроме нижнего (первого) уровня. Выше указывалось, что предельно- допустимые значения частных критериев качества на нижнем уровне известны из технических характеристик каналов передачи информации, требований к качеству обслуживания и уровню информационной безопасности. На более высоких уровнях иерархии при $S>1$, придельные значения частных критериях на каждом $S$-м уровне $I_{ikm}^{(s)}$ неизвестны. В работе [4] предлагается при $S>1$ преодолеть это затруднение путём нормировки в свёртке (4) частных критериев качества $I_{ik}^{(s)}$ не к максимальному значению $I_{ikm}^{(s)}$, а к минимальному значению свёртки частных критериев качества (4). Определим по выражению (4) минимальное значение $I_k^{(s+1)}$. Предположим, что минимизируемые частные критерии качества $I_{ik}^{(s)}$ достигают идеальные нулевые значения. Тогда из выражения (4) следует, что $I_{k\min}^{(s+1)} = 1$, так как $\sum_{i=1}^{n_k^{(s)}} \alpha_{ik}^{(s)} = 1$. Введём в рассмотрение относительные частные критерии качества вида:

$$\overline{I_{ok}^{(s+1)}} = \frac{I_{k\min}^{(s+1)}}{I_k^{(s+1)}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_k^{(s)}} \alpha_{ik}^{(s)} \left[1 - I_{ik}^{(s)} / I_{ikm}^{(s)}\right]^{-1}}. \tag{7}$$

Введённые относительные частные критерии качества (7) преобразуются в максимизируемые критерии качества $\overline{I_{ok}^{(s+1)}}$ на $S$+1-м уровне. Действительно, если $I_{ik}^{(s)}$ стремится к своему максимальному значению $I_{ikm}^{(s)}$, то $\overline{I_{ok}^{(s+1)}}$ обращается в ноль. В том случае, когда $I_{ik}^{(s)}$ стремится к идеальному нулевому значению, относительный частный критерий качества $\overline{I_{ik}^{(s+1)}}$ на $S$+1-м уровне стремится к единице, так как $\sum_{i=1}^{n_k^{(s)}} \alpha_{ik}^{(s)} = 1$. Преобразуем максимизируемый относительный частный критерий качества (7) в минимизируемый

$$I_{ok}^{(s+1)} = 1 - \overline{I_{ok}^{(s+1)}}. \tag{8}$$

Подстановка (7) в (8) даёт выражение для расчёта относительных частных критериев качества на $S$+1 уровнях без знания на уровнях $S>1$ их предельных значений

$$I_{ok}^{(s+1)} = 1 - \left[\sum_{i=1}^{n_k^{(s)}} \frac{\alpha_{ik}^{(s)}}{1 - I_{oik}^{(s)}}\right]^{-1}, \tag{9}$$

где $I_{oik}^{(1)} = I_{ik}^{(1)} / I_{ikm}^{(1)}$.

Таким образом, на втором уровне иерархии критериев качества при $S$=1 расчёт относительных частных критериев качества выполняют по выражению (4), а для остальных

уровней при $S>1$ вычисления относительных частных критериев качества реализуются согласно выражению (9).

Метод иерархической многокритериальной маршрутизации может быть усовершенствован, если его сочетать с многопутевой маршрутизацией, которая позволяет найти несколько независимых параллельных маршрутов передачи информации с близкими оценками по выражению (6). В этом случае увеличивается надежность передачи данных и снижаются риски потери информации или ее модификации. Поэтому предлагается на втором этапе решения задачи повышения информационной безопасности перейти к решению задачи многопутевой маршрутизации по оценкам (6). В задаче многопутевой маршрутизации требуется найти несколько параллельных и независимых маршрутов передачи данных между узлом-источником и узлом-приемником информации, имеющие наименьшие характеристики длины маршрутов по оценкам (6). Известно, что время решения задачи о кратчайшем пути при однопутевой маршрутизации алгоритмом Дейкстры растет пропорционально $O(N^2)$, где $N$ – количество узлов компьютерной сети. В случае многопутевой маршрутизации время решения задачи маршрутизации увеличивается пропорционально количеству искомых путей. В сложных компьютерных сетях существует проблема реализации многопутевой маршрутизации из-за существенного увеличения времени маршрутизации, которое пропорционально оценке $K\ O(N^2)$, где $K$ – количество искомых маршрутов. Решим эту проблему на основе параллельного алгоритма однопутевой маршрутизации и последовательного поиска альтернативных маршрутов в компьютерной сети. Параллельные алгоритмы однопутевой маршрутизации имеют оценку времени решения задачи о кратчайшем пути $O(N)$ [3]. Последовательный поиск альтернативных маршрутов параллельными алгоритмами маршрутизации хотя и увеличивают время поиска $K$ маршрутов в $K$ раз, но сохраняет линейный характер зависимости времени маршрутизации $K\ O(N)$ от сложности компьютерной сети, оцениваемой количеством узлов $N$ компьютерной сети. Предлагается использовать для многопутевой многокритериальной маршрутизации параллельный алгоритм однопутевой маршрутизации, который основан на принципе системоаналогового моделирования. Согласно этому принципу математическая модель компьютерной сети в виде графа разбивается на систему фрагментов графа, каждый из которых содержит вершину графа совместно с несколькими ветвями, входящими в эту вершину [3]. Если соединение фрагментов графа соответствует топологии компьютерной сети, то такая система аналогов-фрагментов графа моделирует компьютерную сеть. На системе фрагментов графа можно задать начальную и конечную вершины, которые соответствуют узлу-источнику и узлу-приемнику компьютерной сети. Среди всевозможных путей между начальной и конечной вершинами графа, которые проходят через ветви каждого фрагмента графа может находиться элемент кратчайшего пути. Необходимым условием принадлежности ветви фрагмента графа кратчайшему пути является минимизация длины всех маршрутов, которые входят в вершину фрагмента графа. Поэтому во всех фрагментах графа необходимо выделять из всех маршрутов, которые приходят в вершины фрагментов графа, маршруты минимальной длины. Параллельный алгоритм однопутевой маршрутизации основан на параллельном выделении в вершинах каждого фрагмента графа маршрутов минимальной длины после увеличения характеристики длины маршрутов на величину весов (длины) ветвей фрагмента графа и в выдаче согласно топологии соединения фрагментов графа новой характеристики длины кратчайшего пути. Как показано в работе [3] параллельное выполнение таких операций во всех вершинах графа за $R$ шагов устанавливает во всех вершинах графа стационарные значения длин кратчайших маршрутов из начальной вершины графа во все вершины фрагментов графа, где $R$ – количество вершин вдоль кратчайшего маршрута с максимальным количеством ветвей. Таким образом, параллельный алгоритм осуществляет построение дерева кратчайших путей из узла-источника во все остальные узлы-приемники графа компьютерной сети.

Сочетание параллельного алгоритма однопутевой иерархической многокритериальной маршрутизации [3] совместно с последовательным способом многопутевой маршрутизации

дают оценку времени решения задачи многопутевой многокритериальной маршрутизации $K$ $O(N)$, где $K$ – количество параллельных маршрутов, $N$ – количество узлов компьютерной сети.

## Выводы

Методы многопутевой и иерархической многокритериальной маршрутизации имеют линейную зависимость времени маршрутизации от количества альтернативных маршрутов и сложности компьютерной сети. Предложенный метод имеет два уровня повышения информационной безопасности пользователей компьютерной сети. Первый уровень обеспечивается путем иерархической многокритериальной маршрутизации учитывающей требования к качеству обслуживания и риски потери информации или ее модификации. Второй уровень повышения информационной безопасности обеспечивается многопутевой маршрутизацией по нескольким параллельным и независимым каналам передачи информации в компьютерной сети.

## Список литературы


1. *Мартынова О.П., Засядько А.А., Баранов В.Л.* Применение многокритериальной маршрутизации для повышения информационной безопасности компьютерных сетей // Проблеми інформатизації та управління: Зб.наук.пр. – К.: НАУ, 2007. – Вип. 3(21). – С. 109-113.

2. *Воронин А.Н.* Многокритериальный синтез динамических систем. – К.:Наук. думка, 1992. – 160 с.

3. *Мартынова О.П.* Параллельный алгоритм маршрутизации на графах и сетях // Проблеми інформатизації та управління: Зб. наук. пр. – К.: НАУ, 2005. – Вип. 12. – С. 113-119.

4. *Воронин А.Н.* Декомпозиция и композиция свойств альтернатив в многокритериальных задачах принятия решений // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – №1. – С. 117-122.

УДК 681.322:519.7

*Ю.М. Мінаєв, д.т.н., М.М. Гузій, к.т.н. (Національний авіаційний університет, Україна)*

# ВИЗНАЧЕННЯ АНОМАЛЬНИХ СТАНІВ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ НА ПІДСТАВІ СТРУКТУРИЗАЦІЇ ТРАФІКА ТЕНЗОРАМИ ПАРНИХ РАНГІВ

*Запропоновано узагальнену цифрову модель трафіка комп'ютерної системи на основі тензорів парних рангів. Процедури аналізу трафіка враховують інваріанти тензор-трафіка і визначають аномальний стан комп'ютерної системи.*

Новим напрямом дослідження комп'ютерних систем (КС) є використання аппарату тензорного аналізу для моделювання процесів у КС. Трафік ком′ютерних систем можна представити у вигляді часових рядів (ЧР) $\{x(t)\}$, що описуються тензором, діагональна матриця якого містить елементи ЧР:

$$\{x(t)\} = \{x(t_1), x(t_2), ..., x(t_n)\} \rightarrow \begin{pmatrix} x(t_1) & 0 & ... & 0 \\ 0 & x(t_2) & ... & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & ... & x(t_n) \end{pmatrix}$$

В залежності від рангу тензора, що моделює весь вихідний ряд, його можна представити у вигляді сукупності згорток ( тензорів більш низьких рангів): $T^{(m)}_{x(t)} \rightarrow T^{(m-2)}_{x(t)} \rightarrow ... \rightarrow T^{(2)}_{x(t)}$, де m– парне число (тензори парних рангів мають властивість згортки). Природно, точність представлення ЧР при цьому буде різною, у кінцевому випадку (при $X = \{x(t)\} = \{x(t_1), x(t_2), ..., x(t_n)\} \rightarrow T^{(2)}_{x(t)}$) шляхом багаторазових усереднень маємо ЧР із дев'яти усереднених елементів. Запропонований підхід дозволяє спростити процедури використання тензорних моделей, тому що в остаточному підсумку тензору високого (парного) рангу може бути зіставлений тензор 2-го рангу

$$\begin{pmatrix} x(t_1) & 0 & ... & 0 \\ 0 & x(t_2) & ... & 0 \\ 0 & 0 & ... & 0 \\ 0 & 0 & ... & x(t_n) \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x(t_1) & 0 & 0 \\ 0 & x(t_2) & 0 \\ 0 & 0 & x(t_3) \end{pmatrix}$$

Узагальнений тензор-трафік може бути представлений у вигляді тензорного добутку $\mathbf{X} \bullet \boldsymbol{\mu}^T$, де $\mathbf{X} = \{x_j\}$, j=1, J; – вектор параметрів трафіка, які визначаються записами системного журналу; $\boldsymbol{\mu} = \{\mu_j\}$ – комбінація 0 та 1, яка враховує значення (або вагу чи вплив) конкретного параметра трафіка на узагальнений трафік (рис. 1). Головна діагональ тензора $\mathbf{X} = \{x_j\}$, j=1, J; – вектор параметрів трафіка. У загальному випадку максимальна кількість параметрів визначається програмою TCP-дамп і дозволяє отримати 9 параметрів, що характеризують трафік.

Якщо припустити, що тензор 2-го рангу $T^x_t$ має власні значення $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, і ввести позначення

$$I = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, II = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, III = \lambda_1^3 + \lambda_2^3 + \lambda_3^3,$$

то, як відомо, справедливі співвідношення $I = tr(T), II = tr(T^2), III = tr(T^3)$ , де tr(T) – слід матриці T, для тензора 2-го рангу $tr(T) = (\sum_i t_{ii})/3$, $T = [t_{ij}]$, i=1,3; j=1,3.

Тензор характеризується системою незалежних головних інваріантів (констант, що не змінюють своїх значень при змінах тензора, зв'язаних зі зміною системи координат). Для тензора 2-го рангу (з матрицею 3×3) інваріанти I виражаються через власні значення наступним чином:

$$I_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3, I_2 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3 + \lambda_2\lambda_3, I_2 = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 .$$

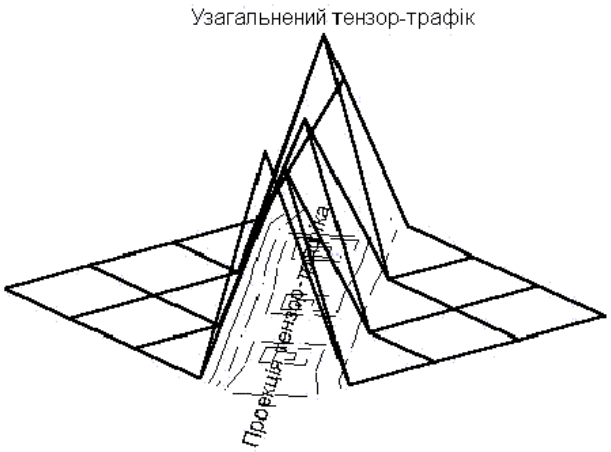



Рис.1 Узагальнений тензор-трафік для моменту часу $t^j$ (врахувано 9 параметрів трафіка)

Слідова форма інваріантів має вигляд:

$$\mathrm{tr}(T) = I_1, \mathrm{tr}(T^2) = I_1^2 - 2I_2, \mathrm{tr}(T^3) = I_1^3 - 3I_1I_2 + 3I_3$$

$$I = I_1, II = I_1^2 - 2I_2, III = I_1^3 - 3I_1I_2 + 3I_3.$$

Структурування ЧР може відбуватися шляхом виконання процедури згортки (розбиття матриці тензора 9×9 та виділення всіх підматриць 3×3 з наступним визначенням суми їх діагональних елементів):

$$T_r = \left(\mathrm{t}_{ij}^{r}\right) = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ x_4 & x_5 & x_6 \\ x_7 & x_8 & x_9 \end{pmatrix}.$$

На підставі головного тензора $T_r = \left(\mathrm{t}_{ij}^{r}\right)$, i,j = 1,3; обчислюють приєднані тензори – симетричний-асиметричний ($\mathrm{T}_S^r, \mathrm{T}_W^r$), девіатор-кульовий ($\mathrm{T}_d^r, \mathrm{T}_i^r$), $T_r = \left(\mathrm{t}_{ij}^{r}\right) \Rightarrow \begin{cases} \mathrm{T}_s^r, \mathrm{T}_w^r \\ \mathrm{T}_d^r, \mathrm{T}_i^r \end{cases}$, для яких у свою чергу обчислюють інваріанти: нульовий (магнітуду), - $I_0$, перший (слід) - $I_1$, другий (сума кофакторів) - $I_2$ та третій (детермінант) - $I_3$.

Тензорні моделі дозволяють обчислити відхилення $\Delta^k_c$, $\delta^k_c$ поточного стану КС від еталонного: $\Delta^k_c = \mathrm{abs}({}^pI_c^k - {}^eI_c^k)$ та $\delta^k_c = \mathrm{abs}({}^pI_c^k / {}^eI_c^k)$ ($\forall c$), c=0,1,2,3; k∈{t, s, w, d, i}, де p, e – поточний та еталонний (аномальний) стани, t - головний тензор, s - симетричний, w - асиметричний, i - кульовий тензори, d - девіатор.

Для спрощення процедур порівняння враховують інваріанти, значення яких у нормальному та аномальному станах різняться на порядки , з ураховуванням знаків ${}^pI_3^d$ та ${}^eI_3^d$ -sign(${}^pI_3^d$) ∧ sign(${}^eI_3^d$). Стан комп'ютерної системи однозначно вважається аномальним якщо виконуються умови: $\delta^k_c = \mathrm{abs}({}^pI_c^k / {}^yI_c^k) \approx 10$ та має місце неспівпадіння знаків третіх інваріантів девіатора.

Тензор 2-го рангу однозначно може бути охарактеризованим вектором, компонентами котрого є ортогональні інваріанти – tau, Sigma, які обчислюються на підставі власних значень тензор-трафіка. Припустимі варіації тензор-трафіка для нормального та аномального станів шляхом побудови відповідних конусів. Конус припустимих варіацій нормального стану – кут $\alpha^н$ між віссю tau та вектором нормального стану приймається як $\alpha^н = \alpha^н + 30^0$; конус припустимих варіацій аномального стану – кут $\alpha^a$ між віссю tau та вектором аномального стану приймається як $\alpha^a = \alpha^a - 30^0$.

Зазначимо, що тензор як об′єкт фізичної природи, більш повно характеризує об′єкт дослідження, ніж його представлення у формі окремих вимірів. Зокрема, приєднані тензори – ізотропний та девіатор- характеризують відповідно *базові* властивості об′єкту, які найменше змінюються, а девіатор – його варіабельні властивості.

Часовий ряд $X = \{x_1\, x_2 \cdots x_9 \quad x_{10}\, x_{11} \cdots x_{18} \quad . \quad . \quad . x_{n-1}\, x_{n-2} \cdots x_{n-8}\, x_n\}$ структурується у вигляді тензора. Для тензора 2-го ранга структурований ЧР

представляється у вигляді об′єднання тензорів 2 –го ранга $(x_1\ x_2\ \cdots\ x_9)^{(0)}$, $(x_1\ x_2\ \cdots\ x_9)^{(1)}$, . . . , $(x_1\ x_2\ \cdots\ x_9)^{(k-1)}$;

Інваріанти структурованого ЧР обчислюються за формулами:

$$(x_1\ x_2\ \cdots\ x_9)\rightarrow\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3\\ x_4 & x_5 & x_6\\ x_7 & x_8 & x_9\end{pmatrix}\rightarrow\begin{cases} I_1=(x_1+\ x_5\ +x_9)/3;\\ I_2=(x_5x_9-x_6x_8)+(x_1x_9-x_3x_7)+(x_1x_5-x_2x_4);\\ I_3=x_1(x_5x_9-x_6x_8)+x_2(x_5x_9-x_6x_8)+x_3(x_4x_8-x_5x_7).\end{cases}$$

Процедура структурування представлена нижче:

| $X=\{x_1\ x_2\ \cdots\ x_9\ \ x_{10}\ x_{11}\ \cdots\ x_{18}\ \ldots\ x_{k-1}\ x_{k-2}\ \cdots\ x_{k-8}\ \ x_k\}$ | | | | | | 1 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $(x_1\ x_2\ \cdots\ x_9)^{(0)}$ | $(x_1\ x_2\ \cdots\ x_9)^{(1)}$ | . . . | $(x_1\ x_2\ \cdots\ x_9)^{(k-1)}$ | | $(x_1\ x_2\ \cdots\ x_8\ )^{(k)}$ | 2 |
| $I_1^{(0)}$ | $I_1^{(1)}$ | | $I_1^{(k-1)}$ | $\rightarrow$ | $I_1^{(k)}$ | 3 |
| $I_2^{(0)}$ | $I_2^{(1)}$ | | $I_2^{(k-1)}$ | $\rightarrow$ | $I_2^{(k)}$ | |
| $I_3^{(0)}$ | $I_3^{(1)}$ | | $I_3^{(k-1)}$ | $\rightarrow$ | $I_3^{(k)}$ | |

На підставі структурування початкового ЧР отримують *розріджені* ЧР, $I_1=\{I_1^{(0)}, I_1^{(1)}\ \cdots I_1^{(k-1)}\}$, $I_2=\{I_2^{(0)}, I_2^{(1)}\ \cdots I_2^{(k-1)}\}$, $I_3=\{I_3^{(0)}, I_3^{(1)}\ \cdots I_3^{(k-1)}\}$, компонентами котрих є інваріанти (кількість інваріантів, отже, розріджених ЧР, дорівнює $r$+1, де $r$ – ранг тензора). Представлення трафіка КС тензором, матриця котрого може бути сформована на підставі різних принципів, дозволяє, по-перше, агрегувати *всі* потрібні для дослідження параметри трафіка, по-друге, уніфікувати аналіз стану комп'ютерної системи. Зазначимо також, що тензор відображає трафік, записаний у системному журналі. Структуризація трафіка, представленного у вигляді запису таблиці БД, виконується наступними правилами:

– якщо кількість параметрів трафіка може бути представлена як $3^n$, n=2, 4, … , то тензор-трафік можна представити у вигляді тензора парних рангів;

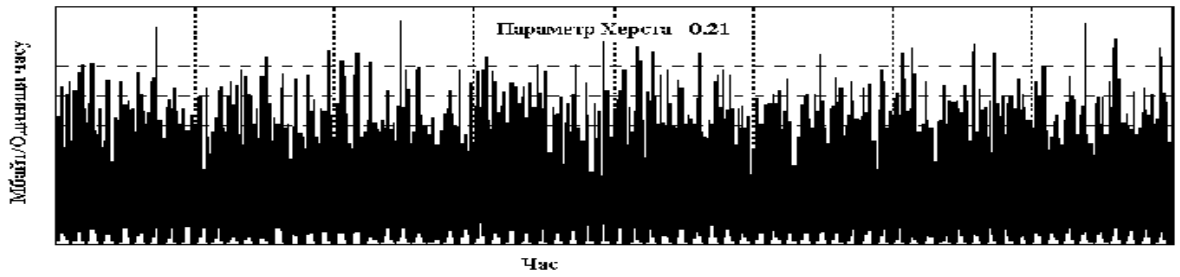
– якщо кількість параметрів не відповідає умові $3^n$, n=1, 2, 3, 4, … , то тензор-трафік має діагональну матрицю, d= $\{x_1, x_2, \ldots, x_n\}$, $x_i \in d$ –і-тий параметр трафіка.

Для уніфікованого аналізу стану КС потрібно визначити функції від тензора та відповідно від матриць, що представляють тензор. Найпростішими функціями від тензорів є їхні розкладення на симетричний-асиметричний, ізотропний –девіатор, інші функції від тензорів можуть бути представлені як функції від інваріантів. У багатьох випадках для визначення аномальних станів КС доцільно використовувати функції від матриць (наприклад трафік КС за інтервал часу $\{t_1\ \ t_2\ \ldots\ t_n\}$ можна представити сукупністю відповідних тензор-трафіків $\{x(t_1)\ x(t_2)\ \ldots\ x(t_n)\}$) (рис. 2).

Нижче наводяться параметри моделювання тензор-трафіка для нормального і аномального станів компютерної системи. Перший інваріант (слід) tr = -1.5800e+010, другий інваріант c = 0, третій інваріант (головний детермінант) det_ta = -1.3602e+017.

Симетричний тензор, утворений з тензор-трафіка

$$s = 1.0e+010 * \begin{bmatrix} 0.0 & 0.785 & 0.0\\ 0.785 & -1.58 & 0.0\\ 0.0 & 0.0 & 0.0\end{bmatrix}$$




| $t_1$ | $t_2$ | . . . | $t_n$ |
|---|---|---|---|
| $\begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_f \\ . & . & . \\ x_c & \dots & x_n \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_f \\ . & . & . \\ x_c & \dots & x_n \end{pmatrix}$ | . . . | $\begin{pmatrix} x_1 & \dots & x_f \\ . & . & . \\ x_c & \dots & x_n \end{pmatrix}$ |

Рис. 2. Тензор-трафік КС

Третій інваріант det_s = -2.3158e+023

Асиметричний тензор

$$a1 = 1.0e+9 * \begin{bmatrix} 0 & -7.85 & 0.0 \\ 7.85 & 0 & -0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0 \end{bmatrix}$$

Третій інваріант det_a1 = 0

Девіатор тензор-трафіка

$$dev = = 1e+10 * \begin{bmatrix} 0.5267 & 0.5267 & 0.5267 \\ 2.0967 & -1.0533 & 0.5267 \\ 0.5267 & 0.5267 & 0.5267 \end{bmatrix}$$

Третій інваріант det_dev=-7.6828e+23

Перший інваріант (слід) tr = -9.2600e+010, другий інваріант = 0, третій інваріант (головний детермінант) det_ta = -3.3369e+016. Симетричний тензор, утворений з тензор-трафіка

$$s = 1.0e+010 * \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.4000 & 0.0000 \\ 0.4000 & -9.2600 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

Третій інваріант det_s = -4.2127e+022

Асиметричний тензор

$$a1 = 1.0e+009 * \begin{bmatrix} 0 & -4.0 & 0.0 \\ 4.0 & 0 & 0.0 \\ 0.0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Третій інваріант det_a1 = 0

Девіатор тензор-трафіка

$$\begin{bmatrix} 3.0867 & 3.0867 & 3.0867 \\ 3.8867 & -6.1733 & 3.0867 \\ 3.0867 & 3.0867 & 3.0867 \end{bmatrix}$$

Третій інваріант det_dev = 1.034e+25

На підставі аналізу отриманих характеристик тензор-трафіка можна істотно підвищити якість процедури виявлення аномального стану КС шляхом використання правил „*якщо - то*" . Висновки, які можна зробити, мають вигляд „ ... *стан трафіка суттєво відрізняється (не відрізняється) від еталонного (або попереднього)*" ; „ *..має місце аномалія трафіка (аномалія відсутня)* ". Запропоновані тензорні моделі трафіку знайшли практичне застосування для побудови систем виявлення атак в комп'ютерних мережах.

## Список літератури

1. *Минаев Ю.Н., Филимонова О.Ю., Гузий Н.Н.* Интеллектуальные технологии в системах идентификации и прогнозирования атак на компьютерные сети. Электронное моделирование, Т. 27.№6, 2005.- С. 37-52

2. *Беляев А., Петренко С.* Системы обнаружения аномалий: новые идеи в защите информации. «Экспресс-Электроника», - #2/2004.

УДК 159.9

*В.В. Митюков, Н.У. Ушаков, кандидат технических наук*
*(Ульяновское высшее авиационное училище гражданской авиации (институт), Российская Федерация)*

# ВИЗУАЛЬНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ДВИЖЕНИЯ ВС ПО АРХИВНЫМ ЗАПИСЯМ, ПОЛУЧЕННЫМ В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ ТРЕНАЖЕРА САМОЛЕТА ЯК-18Т 36 СЕРИИ.

*Поставлена задача визуального проецирования на экран в пространственном ракурсе упражнений, выполняемых курсантами на комплексном тренажере (фирмы «НИТА»). Обоснованы и получены требуемые линейные преобразования архивных параметров полета, с учетом определений, регламентированных ГОСТ 20058-80.*

В процессе отработки упражнений на тренажере самолета Як-18Т 36 серии создаются архивные записи параметров каждого полета, которые могут быть использованы при исследовании эффективности теоретического обучения и тренировок на тренажере, обученности по отдельным курсантам, группам и курсам и т.д. С целью использования данного архива для изучения аэродинамики и динамики полета ВС в целом, и практической аэродинамики самолета Як-18Т 36 серии и его систем, была поставлена задача визуального представления записанных полетов тренажера Як-18Т, средствами компьютерной графики.

Поскольку область компьютерной графики достаточно обширна, в работе обсуждаются главным образом вопросы геометрического отображения пространственных координат, включенных в уравнения движения ВС, в координаты двумерной проекционной плоскости.

Для описания положения воздушного судна (ВС) в пространстве необходимо задать в некоторой системе координат (СК), следующие 6 параметров:

- 3 координаты его центра масс и
- 3 угла последовательных поворотов ВС как твердого тела вокруг осей координат проходящих через его центр масс.

Эти 6 параметров должны быть увязаны с параметрами, включенными в уравнения движения ВС, которые традиционно проецируются на оси связанной системы координат. Предварительно следует напомнить определения этой и некоторых других систем координат, применяемых при моделировании движения ВС.

***Системы координат***

Системы координат, связанные с поверхностью земли и с воздушным судном регламентируются ГОСТ 20058-80. (Динамика летательных аппаратов в атмосфере) [1] . В соответствии с принятыми в нем определениями и обозначениями, наиболее употребимые системы координат могут быть представлены в виде следующей схемы:

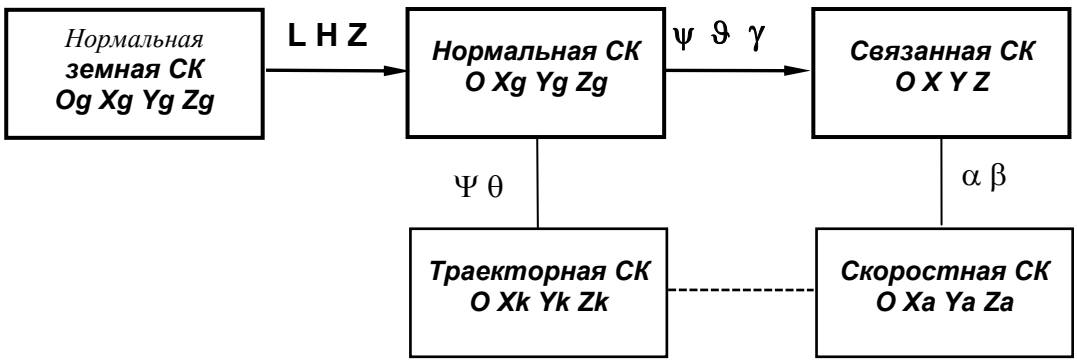



Рис. 1. Основные системы координат, принятые в ГОСТ 20058-80 и связи между ними.

Нормальная земная система координат *Og Xg Yg Zg* (неподвижная).

Ось *Yg* этой СК направлена вертикально вверх (по местному направлению силы тяжести), а направления осей *Xg* и *Zg* и положение начала координат *Og* на поверхности земли выбираются в соответствии с постановкой задачи.

Нормальная система координат *O Xg Yg Zg* (подвижная).

Начало СК располагается в центре масс ВС. Ось *Yg* направлена вертикально вверх (по направлению силы тяжести), направления осей *Xg* и *Zg* выбираются параллельно соответствующим осям нормальной земной СК.

Связанная система координат *O X Y Z* (подвижная)

Начало СК находится в центре масс ВС. Продольная и вертикальная оси расположены в плоскости симметрии ВС. Ось *OX* направлена к носовой, а ось *OY* к верхней части ВС. Перпендикулярная к ним, поперечная ось *OZ*, направлена в сторону правой части ВС.

Траекторная система координат *O Xк Yк Zк* (подвижная)

Начало СК в центре масс ВС. Продольная ось *OXк* совпадает с направлением вектора земной скорости **V***к*, а ось *OYк* расположена в вертикальной плоскости, вверх от земли.

Скоростная система координат *O Xa Ya Za* (подвижная)

Начало СК в центре масс ВС. Продольная ось *OXa* совпадает с направлением вектора воздушной скорости **V**, а ось *OYa* лежит в плоскости симметрии ВС

Положение этих систем координат относительно друг друга, как это вытекает из определений ГОСТ 20058-80 характеризуется следующими параметрами:

L – удаление центра масс ВС вдоль земной поверхности (координата *Xg*)

H – высота центра масс ВС над земной поверхностью (координата *Yg*)

Z – боковое отклонение центра масс ВС (координата *Zg*)

$\psi$ – угол рыскания (соответствует повороту связанной СК, совмещенной с нормальной СК, вокруг своей оси *Y,* или соответственно вокруг оси *Yg*)

$\vartheta$ – угол тангажа (соответствует повороту вокруг оси *Z*, повернутой на угол $\psi$).

$\gamma$ – угол крена (соответствует повороту вокруг оси *X*, повернутой на углы $\psi$ и $\vartheta$).

$\Psi$ – угол пути (поворот траекторной СК, совмещенной с нормальной СК, вокруг оси *Yк*).

$\theta$ – угол наклона траектории (поворот вокруг оси *Zк*, повернутой на угол $\Psi$).

$\alpha$ – угол атаки (поворот скоростной СК, совмещенной со связанной СК, вокруг оси *Za*).

$\beta$ – угол скольжения (поворот вокруг оси *Ya*, повернутой на угол $\alpha$).

Перечисленные элементарные преобразования координат являются аффинными и принадлежат подмножеству линейных преобразований. При выводе рабочих формул для линейных преобразований, необходимо учитывать следующие обстоятельства:

1. Неважно, в какой очередности выполняется произведение матриц, однако важна их последовательность в этом произведении – в общем случае произведение **A**x**B** не равно **B**x**A**, вследствие чего важно строго соблюдать последовательность выполнения поворотов.
2. Перемещение или поворот рассматриваемой системы координат относительно неподвижного объекта эквивалентен переносу или повороту объекта относительно неподвижной системы координат в обратную сторону.
3. В трехмерном пространстве, три координаты (компоненты) *x, y, z* точки, могут быть представлены в виде вектор-строки или вектор-столбца. Линейное преобразование вектор-столбца соответствует умножению его справа на матрицу этого преобразования. Таким образом, матрица каждого последующего преобразования становится левым сомножителем. В случае вектор-строки (как в зарубежной литературе), производится его умножение слева на транспонированную матрицу линейного преобразования, следовательно каждая следующая транспонированная матрица является правым сомножителем.

Далее будет использоваться представление координат в виде вектор–столбца. Тогда матрица последовательности преобразований этого вектор-столбца, будет результатом произведения матриц, расположенных в порядке обратном этой последовательности [2], [3].

*Переход к нормальной системе координат*

Последовательность поворотов ВС на углы ψ, ϑ, γ определена в ГОСТ 20058-80 относительно промежуточных положений осей связанной СК. Чтобы получить координаты переведенного в новое положение ВС относительно нормальной СК, нужно совместить некоторую систему координат наблюдателя с повернутой связанной СК и, поворачивая СК наблюдателя в обратном порядке –γ –> –ϑ –>–ψ, совместить ее оси с осями нормальной СК. Тогда, с учетом пунктов (2) и (3), общая матрица (Rc) преобразования заданных в связанной СК координат ВС в систему координат наблюдателя, совмещенной с нормальной СК, определится следующим произведением матриц [4]:

$$\mathbf{R}c(\gamma, \vartheta, \psi) = \mathbf{R}y(\psi)\cdot\mathbf{R}z(\vartheta)\cdot\mathbf{R}x(\gamma) =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\psi) & 0 & \sin(\psi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\psi) & 0 & \cos(\psi) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\vartheta) & -\sin(\vartheta) & 0 \\ \sin(\vartheta) & \cos(\vartheta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) \\ 0 & \sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{pmatrix} \qquad (1)$$

*Переход к видовой системе координат*

Положение видовой (удобнее как левосторонней) системы координат ($O_v$ $X_v$ $Y_v$ $Z_v$) естественно определить помещением ее начала относительно земной или нормальной СК в точку визирования **v** и направлением оси $Z$ вдоль желаемого направления заданного вектором **n**, например, в сторону начала нормальной СК. Тогда перевод СК наблюдателя в положение видовой СК, осуществится путем следующих геометрических преобразований:

- перенос СК наблюдателя параллельно осям нормальной СК из точки $O$ в точку $O_v$.
- два плоских поворота СК наблюдателя – вокруг своей оси $Y$ до совмещения оси $Z$ с вертикальной плоскостью, проходящей через вектор желаемого направления **n**, на угол $\varphi_y$ и вокруг нового положения оси $X$ на угол $\varphi_x$ до совмещения оси $Z$ с вектором **n**.
- изменение направления оси $X$ на противоположное (переход к левосторонней СК).

С учетом того, что относительно перемещаемой СК, указанные преобразования должны происходить в обратном направлении, общая матрица (**M**v) перехода от нормальной к видовой СК, определится следующим произведением матриц [4]:

$$\mathbf{M}v(\varphi_y\, \varphi_x) = \mathbf{M}yz\cdot\mathbf{R}x(-\varphi_x)\cdot\mathbf{R}y(-\varphi_y) =$$

изменение знака оси X; наклон на угол $-\varphi_x$ вокруг оси X; поворот на угол $-\varphi_y$ вокруг оси Y

$$= \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\varphi_x) & \sin(\varphi_x) \\ 0 & -\sin(\varphi_x) & \cos(\varphi_x) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\varphi_y) & 0 & -\sin(\varphi_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\varphi_y) & 0 & \cos(\varphi_y) \end{pmatrix} \qquad (2)$$

Если проекции вектора **n** на оси нормальной СК – **n** = $\{n_x, n_y, n_z\}$, то:

$$\mathrm{Sin}(\varphi_y) = \frac{n_x}{|n|};\quad \mathrm{Cos}(\varphi_y) = \frac{n_z}{|n|};\qquad \mathrm{Sin}(\varphi_x) = -\frac{n_y}{|n|};\quad \mathrm{Cos}(\varphi_x) = \frac{\sqrt{n_x^2 + n_z^2}}{|n|}; \qquad (3)$$

где $|n| = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}$;

*Центральное проецирование на плоскость*

В перспективном (центральном) отображении, проекция **p** точки **r** объекта, лежит на прямой, соединяющей точку визирования **v** с точкой **r** и определяется параметрическим векторным уравнением:

$\mathbf{p} = \mathbf{v} + t\cdot(\mathbf{r} - \mathbf{v})$ где $t$ – параметр, принимающий значение между 0 и 1.

Наиболее простые преобразования координат будут соответствовать размещению картинной плоскости $O\,X_\text{p}\,Y_\text{p}$ параллельно плоскости $O\,X_\text{v}\,Y_\text{v}$ на расстоянии $d$ от нее, где точка **v** будет иметь координаты – $\{0,\ 0,\ -d\}$. Тогда в системе координат $O\,X_\text{p}\,Y_\text{p}\,Z_\text{p}$ для проекций точки **p** можно записать [3]:

$$\begin{cases} x_\text{p} = t \cdot x_\text{r} \\ y_\text{p} = t \cdot y_\text{r} \\ z_\text{p} = -d + t \cdot (z_\text{r} + d) = 0 \end{cases} \quad \text{Отсюда} \quad t = \frac{d}{d + z_\text{r}}, \ \text{следовательно} \quad \begin{cases} x_\text{p} = \dfrac{d}{d + z_\text{r}} \cdot x_\text{r} \\ y_\text{p} = \dfrac{d}{d + z_\text{r}} \cdot y_\text{r} \end{cases} \qquad (4)$$

Чем ближе оказывается точка **r** к центру проекции **v**, тем меньше $z_\text{r}$ и знаменатель, и соответственно больше координаты $x_\text{p}$ и $y_\text{p}$ точки **p**.

*Преобразования в однородных координатах*

Все рассмотренные преобразования координат при переходе от связанной СК к нормальной, затем к видовой и далее к плоскости проекций, можно свести в обобщенную 4 х 4 матрицу преобразования однородных координат. Это такое обобщение обычных координат, когда точка в трехмерном пространстве рассматривается как проекция точки из четырехмерного пространства, заданной составляющими $\{w{\cdot}x,\ w{\cdot}y,\ w{\cdot}z,\ w\}$. При $w = 1$ координаты этой точки $\{x,\ y,\ z,\ 1\}$ совпадают с координатами трехмерной точки [2] .

Можно показать, что результирующее линейное преобразование трехмерного объекта, заданного в связанной СК, на проекционную плоскость, с учетом (1), (2), (4), примет вид:

$$\begin{pmatrix} x_\text{p} \\ y_\text{p} \\ 0 \\ \hline 1 \end{pmatrix} = \frac{d}{z_\text{r} + s \cdot d} \cdot \begin{pmatrix} x_\text{r} \\ y_\text{r} \\ z_\text{r} \\ \hline \dfrac{z_\text{r} + s \cdot d}{d} \end{pmatrix} = \frac{d}{z_\text{r} + s \cdot d} \cdot \left(\begin{array}{ccc:c} & \mathbf{M}_\text{V} \cdot \mathbf{R}_\text{C} & & \begin{matrix} -x_\text{v} \\ -y_\text{v} \\ -z_\text{v} \end{matrix} \\ \hline 0 & 0 & \dfrac{1}{d} & s \end{array}\right) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ \hline 1 \end{pmatrix}$$

где S – коэффициент общего масштаба объекта

## Выводы:

Получены рабочие формулы для геометрического отображения трехмерного объекта, заданного в связанной системе координат, на произвольно заданную плоскость проекции. Формулы опробовались и исследовались с помощью программы, реализованной в системе визуального программирования «Borland–Delphi». Оставшиеся не рассмотренными вопросы программирования трехмерной графики и конкретные результаты визуализации записанного в архив движения ВС, предполагается опубликовать в следующем докладе.

## Список литературы


1. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. (термины, определения, обозначения) – М.: Изд-во стандартов, 1981.

2. *Фокс А., Пратт М.* Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. -304 с.

3. *Тихомиров Ю.* Программирование трехмерной графики. – СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2000. – 256 с.

4. *Митюков В.В., Ченцов А.А.* Трехмерные преобразования координат в приложении к обзору внекабинного пространства. Проблемы подготовки специалистов для гражданской авиации: Сб. трудов международной научно-технической конференции (25-26 ноября 2004 г.) – Ульяновск: УВАУ ГА, 2004. – с. 178 – 184

УДК 654.1(045)

*О.С. Муранов, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ СИСТЕМНИХ ПОМИЛОК АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ КОМУТАТОРОМ

*Системі управління притаманні системні помилки регулювання, які можуть суттєво знизити корисний ефект адаптивного способу управління комутатором. В результаті аналізу виявлено два різновида системних помилок, що призводять до втрат пакетів або до зниження можливого ступеню завантаження комутатора. Для зменшення впливу помилок в роботі запропоновано новий механізм перерозподілу пропускної здатності комутатора між портами.*

Запропоновано новий адаптивний механізм покрокового дискретного керування перерозподілом пропускної здатності пакетного комутатора між його портами [1]. Цей механізм адаптує у реальному часі смуги пропускання портів комутатора під динаміку змін інтенсивності потоків пакетів, що надходять до цих портів. Але за умови, що сумарна смуга усіх портів у будь-який поточний момент часу не перевищує пропускну здатність комутатора. Завдяки роботі цього механізму динаміка процесу перерозподілу смуги комутатора між його портами майже співпадає із динамікою тренду трафіка на портах. Це дає суттєвий корисний ефект: підвищується коефіцієнт можливого завантаження обладнання комутатора трафіком.

Під час роботи механізму адаптивного перерозподілу виникають помилки, що негативно впливають на якість керування. Проте характер цих помилок, механізм їхнього утворення та ступень впливу на якість керування не досліджено [1]. Тому однією із цілей є дослідження механізму утворення помилок адаптивного керування смугою пропускання комутатора та характеру впливу цих помилок на якість керування.

Механізм перерозподілу повинен мати високі динамічні характеристики, досягнення котрих, зважаючи на високі швидкості обробки пакетів у сучасному вузловому обладнанні, являє собою нетривіальну задачу. Зокрема, в моменти часу, коли інтенсивність потоку пакетів на якомусь порту швидко збільшується, то необхідно швидко збільшити його смугу пропускання, тобто цьому порту треба якомога швидше виділити більшу частку пропускної спроможності комутатора (звісно, за рахунок зменшення часток пропускної спроможності, що виділяються іншим портам). І навпаки. Неважко передбачити, що за таких умов уведення у контур адаптивного керування будь-якого механізму короткострокового прогнозування трафіку, що просувається через порти комутатора, може суттєво покращити ефективність роботи системи керування. Дослідження можливого впливу такого прогнозування на зменшення помилок керування комутатором складає іншу ціль цієї статті.

На рис.1 лінія $I`_1$ відображає тренд потоку на першому порті комутатора, отриманого як результат усереднення виміряних поточних значень інтенсивності цього потоку на п’ятисекундних інтервалах. Верхній графік відображає відрізок зростаючого тренду, а нижній графік – відрізок спадаючого тренду. Як бачимо, тренд має сходинкоподібну форму, де висота сходинки є випадковою величиною, що залежить від динаміки змін тренду, а ширина сходинки – це обраний адміністратором інтервал усереднення. Форма тренду визначається обраним механізмом згладжування первісного трафіка. У даному випадку обрано механізм так званого „відра токенів” [2]. Цей механізм дозволяє перетворити пульсуючі потоки пакетів, що надходять до портів комутатора, у згладжені потоки сходинкоподібної форми – саме такі, що показані на рис.1. У кінці кожного п’ятисекундного інтервалу на основі результатів усереднення автоматично змінюється відповідний параметр механізму „відра токенів”, що приводить до стрибкоподібних змін інтенсивності згладженого потоку пакетів: на ділянках зростаючого тренду сходинки йдуть вгору, а на ділянках спадаючого тренду сходинки йдуть униз.

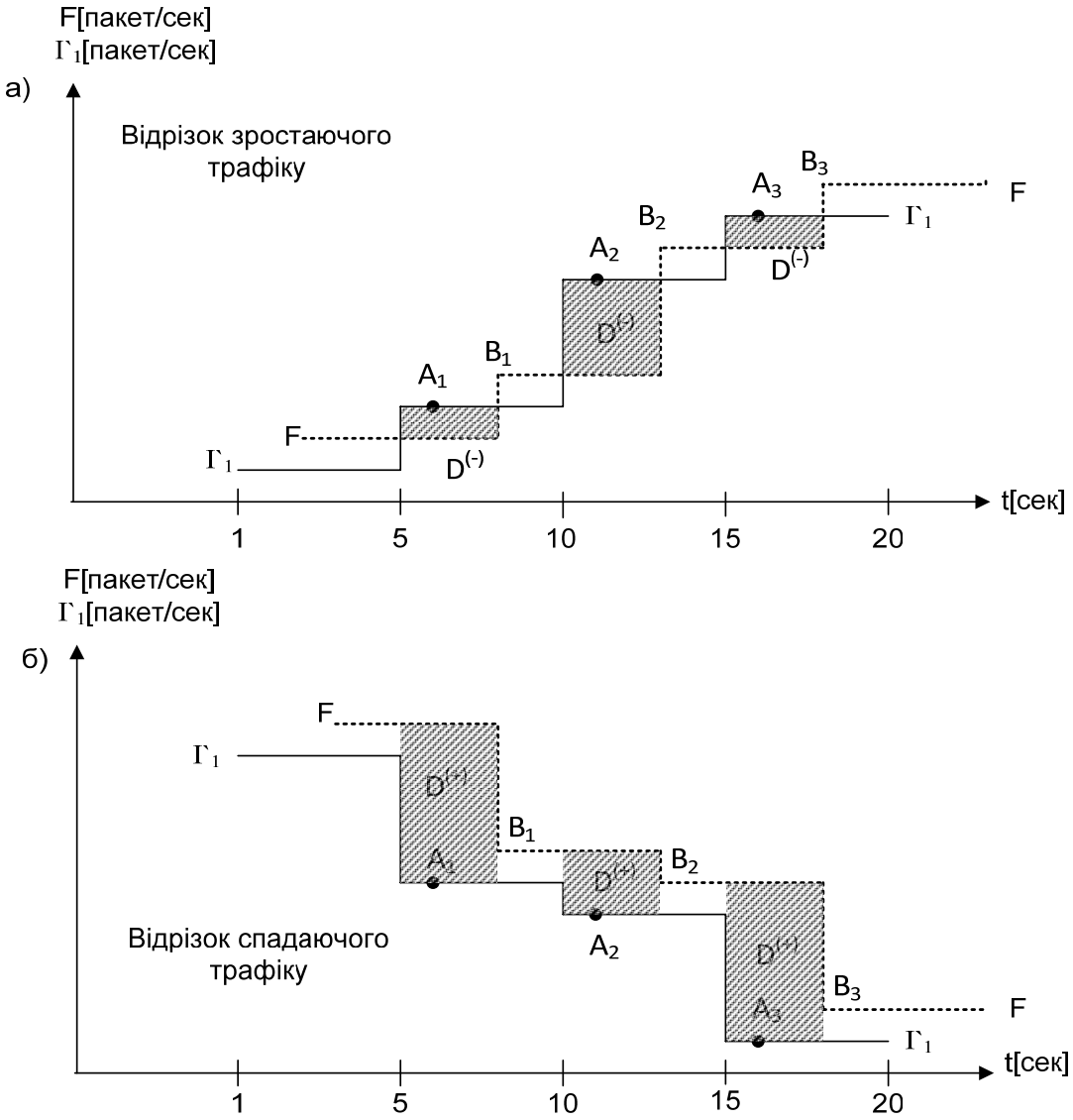



Рис.1. Утворення помилок адаптивного керування без прогнозування

Адаптивний механізм керування перерозподілом має змінювати смугу пропускання порту ПК синхронно із змінами та пропорційно змінам тренду. Дискретний характер змін тренду обумовлює дискретність керування. Смуга пропускання, що виділена першому порту, на рис.1 позначена лінією F. Як бачимо, лінія F повторює за формою лінію $\Gamma`_1$, проте із певним запізненням. Величина запізнення обумовлена, головним чином, швидкодією механізму керування (оскільки на кожному кроці керування потрібен час на обробку даних, що надходять до блоку *БФК*, та на роботу виконавчих механізмів блоку *БВМ*). Окрім того, лінія F проходить дещо вище за лінію $\Gamma`_1$. Відстань по висоті між цими лініями обумовлюється прийнятим запасом щодо неперевищення трендом виділеної смуги порту. На рис.1 тривалість роботи механізму керування визначається відстаню між точками А та В. Зокрема, на інтервалі між п'ятою та десятою секундами тривалість роботи механізму керування визначається часовим проміжком між точками $A_1$ та $B_1$, на інтервалі між десятою та п'ятнадцятою секундами – часовим проміжком між точками $A_2$ та $B_2$ і т.д. При цьому помітимо: щоб уникнути неоднозначності у показах *ЗДВ* (що передає встановлені значення ширини смуг портів до блоку *БФК*), моменти початку роботи механізму керування (точки $A_1$, $A_2$, $A_3$) дещо зміщені відносно початку сходинок лінії $\Gamma`_1$.

Розглянемо роботу механізму керування на відрізку зростаючого тренду. Як бачимо, у цьому випадку існують часові ділянки, коли лінія F розташована нижче, ніж лінія $\Gamma`_1$. (На

рис.2 вони затемнені). На цих ділянках інтенсивність згладженого потоку пакетів перевищує виділену для нього ширину смуги порту. Тобто, внаслідок недооцінки необхідної ширини смуги порту, зробленої на попередньому кроці керування, виник дефіцит смуги на поточному кроці керування, що призвів до втрати певної кількості пакетів. Такого роду помилки адаптивного керування назвемо помилками недооцінки смуги $D^{(-)}$. Як противага помилкам $D^{(-)}$, уведемо показник помилок переоцінки смуги пропускання порту $D^{(+)}$, що пов'язується із ситуацією надлишкового надання смуги певному порту, коли виділена смуга перевищує інтенсивність згладженого потоку пакетів.

Розглянемо роботу механізму керування на відрізку спадаючого тренду (див. нижній графік на рис.1). Як бачимо, у цьому випадку не існують часові ділянки, коли лінія F розташована нижче, ніж лінія $I`_1$. Це свідчить про відсутність помилок типу $D^{(-)}$. На будь-яких ділянках спадаючого тренду інтенсивність згладженого потоку пакетів не перевищує виділену для нього ширину смуги порту. Проте внаслідок запізнення моментів змін ширини смуги порту відносно змін тренду згладженого потоку пакетів виникають ділянки (на рис.2 вони затемнені), де різниця у рівнях між лініями $I`_1$ та F є більшою, ніж прийнятий запас щодо не перевищення трендом виділеної смуги порту. Отже, на цих ділянках виникають помилки переоцінки смуги $D^{(+)}$, що негативно впливають на рівень завантаженості порту.

Слід підкреслити, що помилки недооцінки типу $D^{(-)}$ у механізмі керування є явно небажаними, оскільки вони призводять до втрат пакетів. У той же час помилками переоцінки типу $D^{(+)}$ при вирішенні більшості експлуатаційних завдань можливо знехтувати, оскільки вони лише несуттєво погіршують рівень завантаженості порту. На жаль, обидва типи помилок носять системний характер, що пов'язано із інерційністю процесу керування. Ці помилки неможливо повністю усунути. Проте їх можливо зменшити і, навіть, перетворити один тип помилок в інший. У контексті адаптивного керування інтерес являє можливість перетворення помилок типу $D^{(-)}$ в помилки типу $D^{(+)}$. Така можливість виникає, якщо у контур системи керування перерозподілом смуг портів комутатора включити механізм прогнозування тренду.

Величина помилок (як $D^{(-)}$, так і $D^{(+)}$) є пропорційною площам затемнених прямокутників, що зображені на рис.1. Зрозуміло: щоб зменшити похибки керування, треба вчинити дії, які приводять до зменшення площ цих прямокутників. Висоти прямокутників можливо зменшити, якщо збільшити коефіцієнт усереднення первісного трафіка. Проте така дія призведе до збільшення затримок пакетів у вхідних чергах портів комутатора, що в багатьох випадках – вкрай небажано. Ширини прямокутників можливо зменшити, якщо збільшити швидкодію автоматичної системи регулювання (так, щоб відстань, наприклад, між точками $A_1$ та $B_1$ була меншою). Проте таке можливо зробити лише до певних меж, оскільки цій системі притаманна кінцева інерційність.

Пропонується ще один спосіб зменшення площ затемнених прямокутників шляхом використання на кожному кроці керування процедури прогнозування найближчої майбутньої точки тренду, де цей тренд має стрибкоподібно змінитися. На практиці важливо зменшити помилки недооцінки смуги порту $D^{(-)}$, котрі, як вже вказувалось, можуть виникати лише на відрізках зростаючого тренду. Тому для пояснень ефекту зменшення помилок недооцінки за рахунок використання механізму прогнозування розглянемо відрізок зростаючого тренду, що складається із трьох сходинок (див. рис.2).

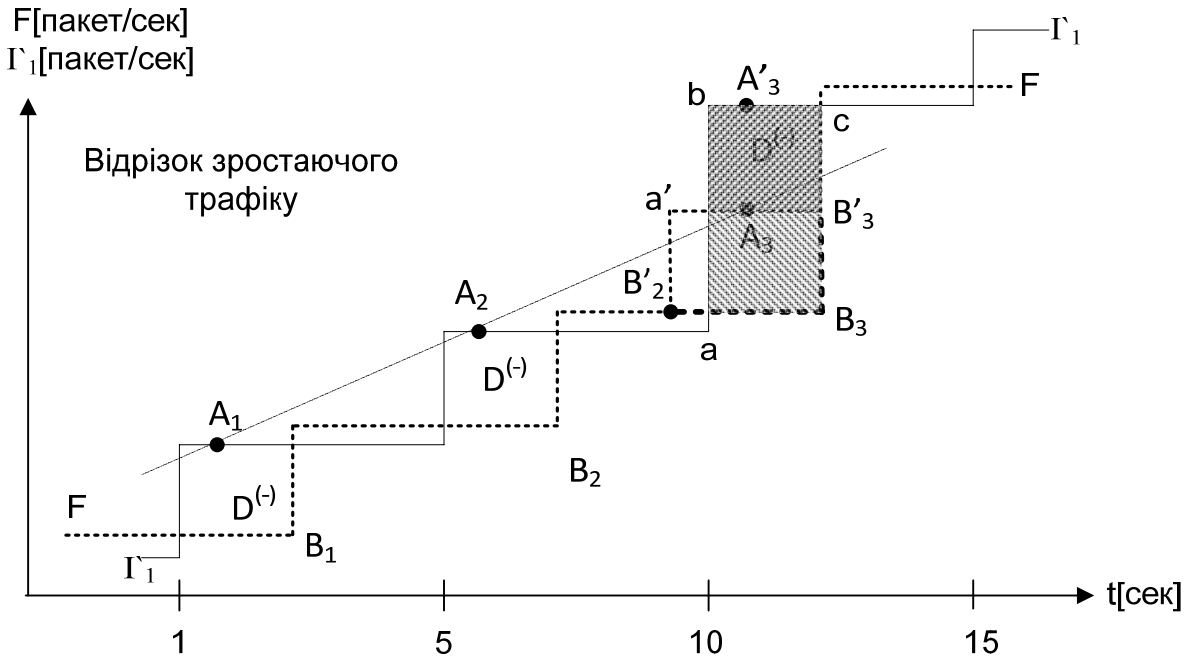



Рис.2. Ефект зменшення помилок недооцінки смуги порту внаслідок використання механізму прогнозування

Точками $A_1$, $A_2$, $A_3$ позначено моменти початку кроків керування. У ці моменти від *ЗДВ* на *БФК* передаються встановлені на попередньому кроці керування значення ширин смуг пропускання портів. Точками $B_1$, $B_2$, $B_3$ позначено моменти закінчення кроків керування. У ці моменти виконавчі механізми блоку *БВМ* закінчують процес збільшення або зменшення смуг пропускання портів комутатора. Затемнені площі трьох прямокутників на рис.2 ілюструють величини похибок недооцінки $D^{(-)}$ щодо трьох поточних кроків керування. Зокрема, величина похибки недооцінки на третьому кроці керування за умов відсутності прогнозування визначається площею прямокутника *авсВ3*. Покажемо, яким чином прогнозування може зменшити похибку недооцінки на третьому кроці керування. Для цього використаємо найпростіший механізм лінійного прогнозу, тобто на основі даних щодо двох точок тренду $A_1$ та $A_2$ визначимо прогнозну оцінку висоти третьої сходинки, яку позначимо як $A^1_3$. Знаючи координати двох точок, неважко побудувати пряму, що проходить через ці точки. Зрозуміло, що прогнозна точка $A^1_3$ має знаходитись на цій прямій. Знаючи прогнозну точку ще то того, коли відбудеться черговий стрибок тренду, можливо модифікувати алгоритм керування таким чином, щоб безпосередньо перед цим стрибком (на рис.2 - у точці $B^1_2$) змінити смугу пропускання порту до величини $A^1_3$. Тоді величина похибки недооцінки на третьому кроці керування визначиться площею прямокутника а'*всВ'3*. Як бачимо, площа цього прямокутника менша за площу прямокутника *авсВ3* за умови, якщо помилка прогнозу буде не перевищувати висоту сходинки тренду.

Таким чином, удосконалення механізму керування у напрямку зменшення помилок типу $D^{(-)}$ полягає в тому, що на кожному кроці прогнозування на основі кількох останніх точок тренду потоку пакетів визначається найближча майбутня точка цього тренду. Ця точка сприймається системою регулювання як значення ширини смуги порту, що має бути встановлено безпосередньо перед найближчим майбутнім стрибком тренду. Чим менша похибка прогнозу, тим менша помилка недооцінки ширини смуги порту.

Якщо вищенаведений механізм застосувати до спадаючих ділянок тренду, то можливо упевнитись, що в деяких випадках маємо погіршення, але помилки переоцінки $D^{(+)}$, яка на практиці у більшості випадків не є суттєвою. Якщо це не так, то механізм прогнозування на спадаючих ділянках тренду слід відключати.

Привабливою особливістю використання прогнозування на зростаючих відрізках трафіку є існування ефекту перетворення помилок недооцінки $D^{(-)}$ у помилки переоцінки $D^{(+)}$, які, як вже вказувалось, зазвичай не мають суттєвого значення. Припустимо, що прогнозне значення висоти третьої сходинки на рис.2 виявилось більшим, ніж $A_3$. Тоді лінія $A'_3\ B'_3$ проходила вище лінії *вс*, що означало б зникнення помилки недооцінки і появу помилки переоцінки. Ця ситуація відображена на рис.3.

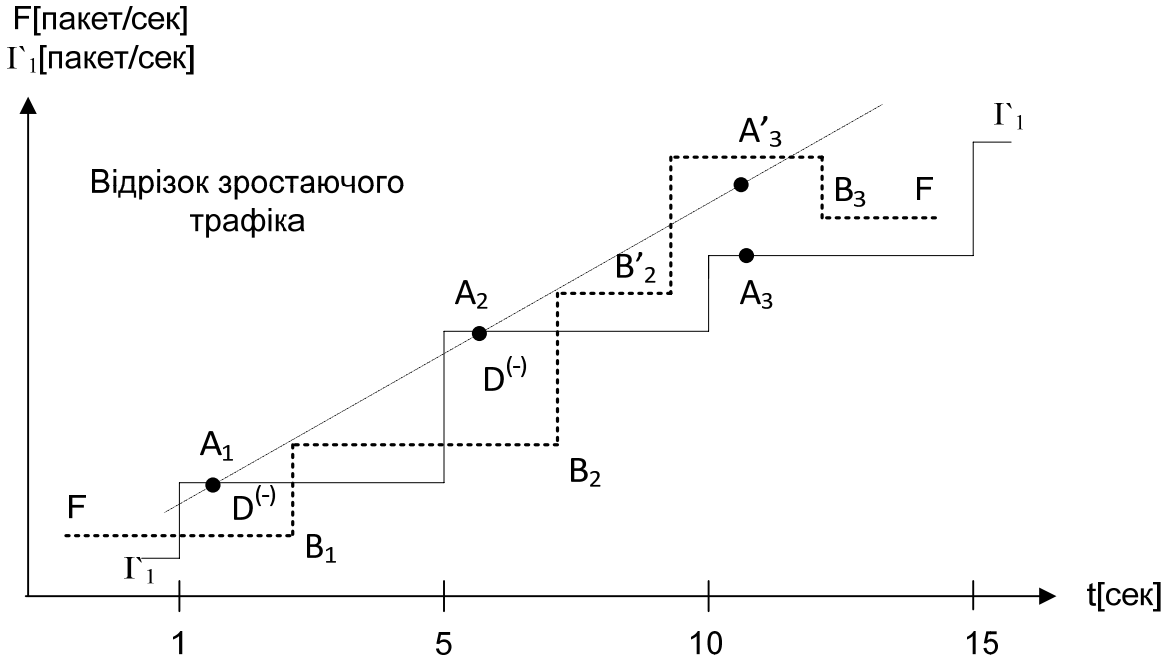



Рис.3. Ефект перетворення помилки типу $D^{(-)}$ у помилку типа $D^{(+)}$

**Висновки**

1. Робота системи адаптивного перерозподілу пропускної здатності комутатора між його портами супроводжується виникненням системних помилок керування, що призводить, в одних випадках, до підвищення рівню втрат пакетів, а в інших, до зниження коефіцієнту завантаження комутатора корисним трафіком.

2. При вирішенні більшості експлуатаційних завдань більш важливою є задача зменшення помилок, що пов'язані із втратами пакетів. Цю задачу пропонується вирішувати шляхом уведення в контур адаптивного керування механізму прогнозування тренду трафіка пакетів.

3. Механізм прогнозування дозволяє зменшити, а за певних умов і усунути помилки, що призводять до втрат пакетів.

**Список літератури**

1. *Ю.А. Кочергин.* Задача авторегулирования перераспределением пропускной способности пакетного коммутатора между его портами // Математичні машини і системи. Вип. 2. – 2006.

2. *В.Г. Олифер, Н.А. Олифер*. Компьютерные сети. 3-е изд. –СПб: Питер, 2006. – 958с.

УДК 654.1(045)

*О.С. Муранов, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# УДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЗМУ ЗГЛАДЖУВАННЯ ПАКЕТНОГО ТРАФІКА ТИПУ „ВІДРО ТОКЕНІВ”

*Запропонований механізм згладжування дозволяє не тільки обмежити середню швидкість і величину пульсацій потоку пакетів, але й сформувати потрібний сходинко подібний тренд. Цей тренд повторює форму кривої адаптивного управління. Запропонована система адаптивного управління з використанням механізму прогнозування дозволяє зменшити помилки недооцінки смуги порту, а в деяких випадках і перетворити помилки недооцінки в помилки переоцінки.*

Для підвищення рівня завантаженості вузлового обладнання пакетних мереж в роботах [1-2] пропонується використовувати покроковий дискретний механізм адаптивного перерозподілу пропускної здатності комутатора між його портами. Цей механізм адаптує у реальному часі смуги пропускання портів комутатора під динаміку змін інтенсивності потоків пакетів, що надходять до цих портів. Але за умови, що сумарна смуга усіх портів у будь-який поточний момент часу не перевищує пропускну здатність комутатора. Завдяки роботі цього механізму динаміка процесу перерозподілу смуги комутатора між його портами майже співпадає із динамікою тренду трафіка на портах. Це дає суттєвий корисний ефект: підвищується коефіцієнт можливого завантаження обладнання комутатора трафіком. Механізм перерозподілу повинен мати високі динамічні характеристики, досягнення котрих, зважаючи на високі швидкості обробки пакетів у сучасному вузловому обладнанні, являє собою нетривіальну задачу. Зокрема, в моменти часу, коли інтенсивність потоку пакетів на якомусь порту швидко збільшується, то необхідно швидко збільшити його смугу пропускання, тобто цьому порту треба якомога швидше виділити більшу частку пропускної спроможності комутатора (звісно, за рахунок зменшення часток пропускної спроможності, що виділяються іншим портам). І навпаки. Неважко передбачити, що за таких умов уведення у контур адаптивного керування будь-якого механізму короткострокового прогнозування трафіку, що просувається через порти комутатора, може суттєво покращити ефективність роботи системи керування.

Проте робота системи адаптивного перерозподілу супроводжується виникненням системних помилок регулювання, що призводить, в одних випадках, до підвищення рівню втрат пакетів, а в інших, до зниження коефіцієнту завантаження комутатора корисним трафіком [3]. В якості одного із можливих шляхів зменшення впливу системних помилок на якість управління механізмом перерозподілу пропонується включення у контур управління механізму прогнозування характеристик пакетного трафіку, що надходять до портів комутатора. У [3] показано, яким чином механізм прогнозування інтегрується у склад системи адаптивного керування. Запропонована відповідна структура адаптивної системи керування, що використовує механізм прогнозування. Проте для ефективного функціонування цього механізму у складі системи керування необхідно певним чином сформувати тренди потоків пакетів, що просуваються через порти пристрою пакетної комутації. З цією метою пропонується використати фізичний механізм згладжування потоку, що базується на звісному алгоритмі так званого «відра токенів». Цей механізм за певних умов, що виконуються на практиці, перетворює нестаціонарний потік пакетів із «гострими» пульсаціями у стаціонарний потік із згладженими контрольованими коливаннями його інтенсивності відносно звісного середнього значення. Для забезпечення можливості включення цього механізму у контур адаптивного керування запропоновано відповідні доробки механізму «відра токенів».

Механізм формування пакетного трафіка із назвою „відро токенів” дозволяє перетворити у певних межах первісний нестаціонарний потік пакетів у вторинний

стаціонарний згладжений потік, що є більш прогнозованим. Якщо нестаціонарний потік характеризується невизначеністю як його середньої швидкості, так і обсягом пульсацій, то засобами названого механізму можливо встановити на наперед заданому проміжку часу (інтервалі усереднення) майже постійну величину середньої швидкості вторинного потоку і отримати, хай і не визначену, але контрольовану величину пульсацій згладженого потока пакетів.

Алгоритм відра токенів широко висвітлений у публікаціях (наприклад, у [4]), але щодо відносно вузьких сфер його застосування. У даному випадку модифікуємо механізм роботи цього алгоритму з тим, щоб його можливо було б включити у контур адаптивного управління смугами портів комутатора.

Принцип дії запропонованої модифікації механізму відра токенів показано на рис.1.

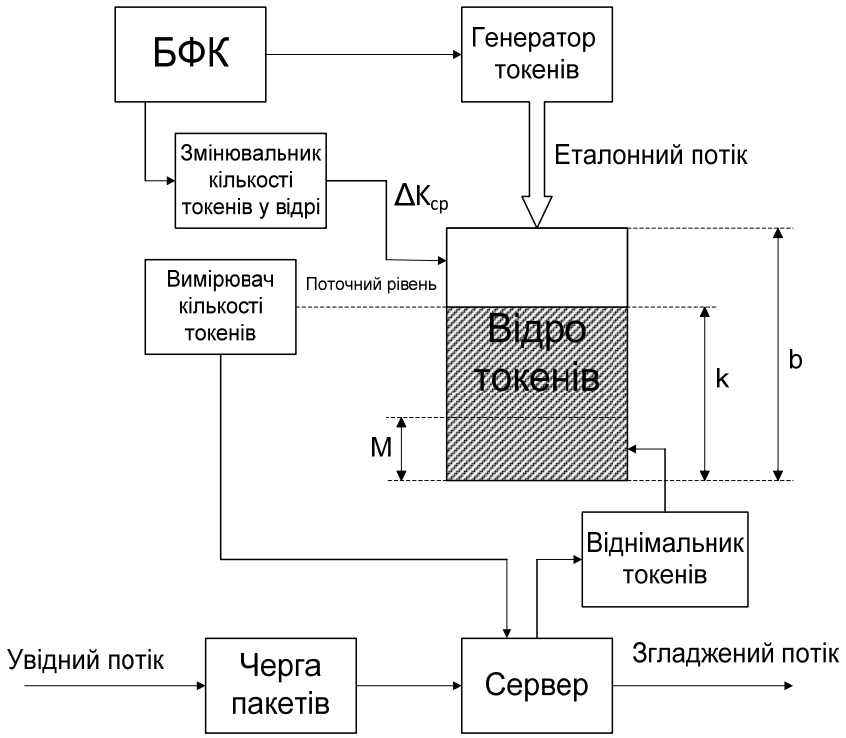



Рис.1. Модифікований механізм реалізації алгоритму відра токенів

Зазначимо, що робота цього механізму базується на порівнянні параметрів вхідного (реально надходячого до порту) пульсуючого потоку із параметрами синтезованого цим механізмом еталонного потоку. Еталонний потік – це утворений генератором токенів потік, що втікає в умовне відро. А токен – це абстрактний об’єкт, носій порції інформації, що використовується для побудови еталонного потоку. Генератор токенів періодично із постійним інтервалом $\tau$ спрямовує черговий токен у відро, що має обмежений об”єм $b$ байт. Усі токени мають однакову довжину $m$ байт, а період подачі токенів обирається таким чином, щоб відро заповнювалося токенами із швидкістю $r$ біт/с, де $r=8m/\tau$. Алгоритм роботи механізму відра токенів побудовано таким чином, що параметр $r$ задає інтенсивність (тобто, середню швидкість) згладженого потоку пакетів, а об’єм відра $b$ задає максимально дозволений розмір пульсацій цього потоку. Якщо відро заповнюється до країв (тобто, коли сумарний обсяг токенів у відрі стає рівним $b$ байт), то надходження токенів до відра тимчасово припиняється. У той же час після проходження кожного окремого пакета через сервер (див. рис.1) із відра витікає порція інформації розміром $M$ байт, що переноситься цим пакетом. Тобто, віднімальник токенів (див.рис.2.3) із поточної кількості токенів, що знаходяться у відрі, віднімає ту кількість інформації, що переносить один пакет. Таким чином, в залежності від „поведінки” потока, що просувається через сервер, рівень токенів у

відрі коливається, проте кожні $\tau$ секунд він збільшується на $r\tau/8$ байт. Якщо інтенсивність реального потоку на сервері перевищує інтенсивність еталонного потоку, то рівень токенів у відрі збільшується, а у протилежному випадку – навпаки. Фактично відро токенів являє собою лічильник, поточні показання котрого коливаються, але кожні $\tau$ секунд вони збільшуються на $m$ байт.

В процесі роботи механізму здійснюється порівняння еталонного потока із реальним первісним потоком пакетів, що надходять до порта комутатора та утворюють черги пакетів. Таке порівняння виконує сервер – абстрактний пристрій, що за певної умови пропускає через себе пакети із виходу черг (див. рис.1). Сервер передає пакет із увідної черги на вивід сервера тільки, якщо у момент надходження пакета на сервер відро було заповнено токенами не менш, ніж на $M$ байт, де $M$ – довжина (розмір) пакета. Тому у механізм відра токенів включено вимірювач поточної кількості (тобто, рівня) токенів $k$ у відрі. Якщо сервер пропустив пакет через себе, то у цей момент завдяки віднімальнику із відра викидається $M$ байт. Якщо ж у момент надходження пакета із черги до сервера, відро було заповнено менш, ніж на $M$ байт, то вивід пакетів із черги призупиняється доти, поки відро заповниться хоча б на $M$ байт.

Як бачимо, алгоритм відра токенів забезпечує саморегуляцію та взаємоузгодження двох потоків. Якщо середня швидкість еталонного потоку перевищує інтенсивність реального потоку, то відро поступово заповнюється, аж поки не переповниться (у момент переповнення припиняється подача токенів у відро). Якщо ж середня швидкість еталонного потоку буде нижчою, ніж інтенсивність реального потоку, то відро поступово спустошується, аж поки кількість токенів у відрі стане меншою, ніж довжина пакета (у цей момент пропуск пакетів через сервер припиняється).

Слід зазначити, що механізм відра токенів припускає можливість обробки пульсацій лише у певних межах. Нехай пропускна здатність вивідного інтерфейсу сервера дорівнює $R$ біт/с. Тоді середня швидкість потоку на виводі сервера на проміжках часу $t$ дорівнює мінімуму, що обирається із двох величин: $R$ або $r + b/t$. При великих значеннях $t$ швидкість вивідного потоку буде наближатися до $r$ (що вказує на те, що механізм забезпечує бажану середню швидкість). У той же час не виключено, що на протязі невеликогоо проміжку часу реальна швидкість вивідного потоку буде перевищувати середню швидкість $r$. Якщо $r$ наближається до $b/t$ (при умові, що $b/t$ менше $R$), то швидкість цього потоку наближається до $r + b/t$. При цьому проміжок $t$ відповідає тривалості пульсації трафіка. Ця ситуація спостерігається тоді, коли на протязі певного часу пакети не надходили до сервера, так що відро повністю наповнилося токенами. Якщо після цього на увід сервера надійде тривала послідовність пакетів, то ці пакети будуть подаватися на вивід сервера без інтервалів один за одним із швидкістю $R$. Максимальна тривалість такої пульсації складає $b/(R-r)$ сек, після чого обов”язково настане пауза, що необхідна для заповнення спустошеного відра. Обсяг пульсації складе $R\ b(R-\ r)$байт. Із наведеного співвідношення видно, що механізм починає гірше працювати, якщо $r$ обирається близькою до $R$.

Якщо механізм відра токенів включити у контур адаптивного управління смугою пропускання порту комутатора, то необхідно забезпечити синхронність змін ширини смуги цього порту із змінами середньої швидкості згладженого потоку. Для цього керуючі сигнали із виходу блока формування команд (*БФК*) слід подати на генератор токенів. Ці сигнали мають керувати змінами довжини токенів відповідно до змін смуги пропускання порту. Якщо *БФК* на певному кроці управління прийняв рішення збільшити смугу порту, то на генератор токенів подається команда на збільшення довжини токену $m$ (у цьому випадку збільшиться середня швидкість згладженого потоку). У разі необхідності зменшення смуги порту подається команда на зменшення довжини токену. Щоб робота модифікованого механізму відра токенів у складі адаптивної системи управління була коректною, необхідно також забезпечити стрибкоподібні зміни рівню заповнення відра на границях інтервалів $\tau$. Зокрема, у ці моменти часу необхідно змінювати середній рівень токенів у відрі пропорційно

змінам ширини смуги порту, що здійснює адаптивний механізм перерозподілу. Тренд зміни рівня токенів у відрі показано на рис.2.

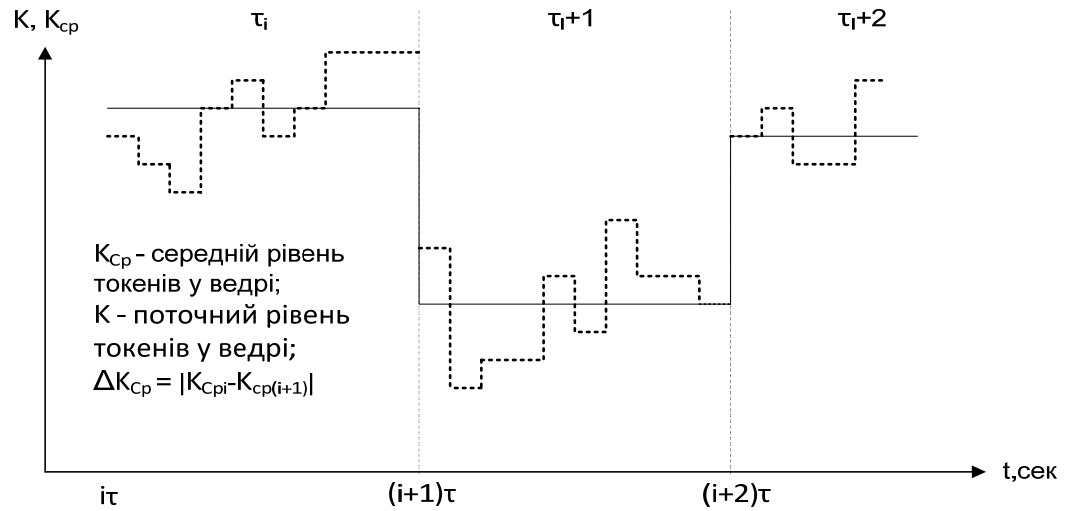



Рис.2. Характер змін рівня токенів у відрі (поточні показання лічильника)

## Висновки

1. Для практичної реалізації системи адаптивного керування механізмом перерозподілу пропускної здатності пакетного комутатора між його портами необхідно створити структуру фізичного механізму згладжування потоків пакетів, що був би здатним забезпечити синхронність змін ширини їхніх смуг із змінами середніх швидкостей згладжених потоків.

2. За основу створюваного механізму згладжування було узято алгоритм «відра токенів». У цей механізм було внесено наступні зміни. У класичну схему алгоритму додано змінювальник кількості токенів у відрі, а керуючі сигнали із виходу блока формування команд (*БФК*) системи керування подано на генератор токенів. Як результат, забезпечено стрибкоподібні зміни рівню заповнення відра на границях інтервалів $\tau$. Зокрема, у ці моменти часу середній рівень токенів у відрі змінюється пропорційно змінам ширини смуги порту, що здійснює адаптивний механізм перерозподілу.

### Список літератури

1. *Ю.А. Кочергин.* Задача авторегулирования перераспределением пропускной способности пакетного коммутатора между его портами // Математичні машини і системи. Вип. 2. – 2006.

2. *Муранов О.С., Чуприн В.М., Потапов В.Г.* Метод динамічного перерозподілу продуктивності пакетного комутатору між його портами з використанням механізму прогнозування пульсацій трафіка // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць. №2(24). – Київ: НАУ, 2008. С.136-144.

3. *Муранов В.С., Кочергін Ю.А., Чуприн В.М.* Дослідження впливу механізму прогнозування трафіка на якість системи адаптивного керування комутатором. // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць. №2(25). – Київ: НАУ, 2008. С.136-144.

4. *В.Г. Олифер, Н.А. Олифер*. Компьютерные сети. 3-е изд. –СПб: Питер, 2006. – 958с.

УДК 004.94 (045)

*В.І. Надточій, к.т.н.*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# OPNET ЯК ЗАСІБ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

*Розглянуті програмні комплекси OPNET для дослідження процесів в сучасних і перспективних комп'ютерних мережах. Наведені технологічні можливості і проаналізовані основні характеристики засобів імітаційного моделювання мереж.*

Моделювання технологічних рішень з розбудови, модернізації і проектування нових мережевих рішень на сьогодні базується на використанні: аналітичних моделей, імітаційних методів дослідження і методів напівнатурного моделювання інформаційних процесів. Останній метод використовується в реальних або частково реалізованих апаратно мережах, в контур яких включаються спеціальні апаратно-програмні засоби подій, що призводять до генерації потоків даних заданих форматів.

Всі ці моделі активно використовуються з метою створення комплексів моделей апаратних і програмних засобів мережевих комплексів, відпрацювання нових технологій будови глобальних і локальних мереж.

Дослідження процесів у сучасних комп'ютерних мережах базується на використанні спеціальних технічних і програмних засобів які дозволяють накопичувати статистичний матеріал з метою його подальшої обробки і оцінки. Аналіз збережених даних дає можливість отримати інформацію про завантаження окремих структурних елементів мережі, отримати і обчислити дані про середні та пікові навантаження пасивних і активних вузлів мережі та інші дані.

Окремим напрямом моделювання комунікаційних мереж є використання спеціальних програм-імітаторів. На сьогодні відома безліч програм-імітаторів, що дозволяють моделювати процеси в комунікаційних мережах. Найбільш цікавими в сенсі можливостей і використання є програми-імітатори: NS (версії 2 і 3) та OPNET Modeler.

**Комплекс OPNET**. Програмний комплекс OPNET було розроблено в лабораторії інформації і систем прийняття рішень в Масачусетському інституті технологій в 1984 під керівництвом Д. Бертсекаса (D.Bertsekas) та Р.Галлагера (R. Gallager) [1].

OPNET являє собою комплекс програмних засобів з широким діапазоном можливостей, є, по суті, промисловим рішенням для моделювання і імітації комунікаційних мереж, пристроїв і протоколів. Реалізує об'єктно-орієнтований підхід до моделювання і включає графічні редактори, що віддзеркалюють актуальну структуру мережі і мережеві компоненти. Дозволяє виконувати імітаційне моделювання повністю гетерогенних мереж з різноманітними протоколами.

Імітатор мереж з графічним інтерфейсом виявився зручним інструментом для виконання досліджень військового спрямування. Виділені гроші на проведення досліджень з розробки та моделювання перспективних комутаційних мереж дозволили створити цікавий інструмент досліджень як дротових так і бездротових мереж, реалізувати на практиці теоретичні проекти його керівників в галузях комунікацій і інформаційних технологій, створивши модульний ієрархічний інструмент моделей і технологій, що були об'єднані завданням надійної передачі даних через ненадійні комунікаційні мережі.

В середині 80-х років програма OPNET була розроблена в США і позиційована як перший комерційний імітатор комп'ютерних мереж. Підтримує багато типів комп'ютерних мереж і технологій. Програма коштує досить дорого але існує можливість використання вільних ліцензій для академічних цілей.

**Методологія моделювання.** OPNET є імітатором мережевого рівня, оперує на «пакетному рівні». Моделюючий комплекс OPNET Modeler Workflow базується на

використанні моделей різноманітних протоколів, пристроїв, технологій. Імітацію бездротових і дротових комунікаційних мереж реалістичного масштабу можна виконувати з метою подальшого аналізу отриманих результатів імітації швидко з використанням простого, інтуітивного інтерфейсу. Імітатор має великі можливості в частині моделювання нових технологій але їх реалізація потребує значних зусиль.

OPNET може бути використаний як дослідницький інструмент або як знаряддя аналізу чи засіб проектування. Рівень складності програми для розробника моделей – високий, а для кінцевого користувача - не дуже високий. Програмний комплекс організований ергономічно, підтримує ефективну інтерактивну взаємодію з користувачем.

OPNET має інтерфейс високого рівня для кінцевого користувача, що створений з програмних модулів C/C++ з бібліотекою, де зберігається величезна кількість спеціальних функцій .

Бібліотека моделюючого комплексу включає більш ніж 400 моделей протоколів і моделей мережевих пристроїв від виробників-лідерів, що дозволяє прискорити процесс проектування. До найбільш популярних моделей протоколів можна віднести: IPv6, MPLS, RIPng, Satellite technology, TCP, TDMA, UMTS, VLAN, VoIP, VPN, WiMAX (802.16e), WLAN (802.11a, b, e, g), ZigBee (802.15.4), BGP, HAIPE, SIP.

Моделі мережевого обладнання доступні до використання, розроблені для пристрої та систем відомих виробників, наприклад: Alcatel-Lucent, Cisco Systems, Extreme, Foundry, HP, IBM, Juniper, Nortel. Всі моделі супроводжуються відкритим кодом (Open Model Source Code), з метою полегшення їх налаштування в процесі моделювання.

**Ієрархічна структура.** Базується на сукупності ієрархічно зв'язаних редакторів, які дозволяють створювати структуру реальних мереж. Структура моделюючої програми складається з редакторів:

- Проекту ;
- вузлів;
- процесів.

Перший з редакторів (Project Editor) дозволяє в графічному режимі створювати мережі, підмережі, топологію комунікаційної мережі, вводити географічні координати, мобільні елементи. Мережі складаються з вузлів (комутатори, маршрутизатори, робочі станції, сервери, мобільні пристрої) і комунікаційних моделей (Ethernet, ATM, FDDI і т.д.). Є можливим управляти складеною мережею, що включає вкладені підмережі: країни, міста, будинку, поверху і т.д. Редактор проекту мережі підтримує географічний аспект визначення топології і введення фізичних характеристик мереж в інтерактивному режимі. Проект може включати декілька сценаріїв для спрощення процедур порівняння варіантів.

Другим є редактор вузлів (Node Editor) який дозволяє описувати внутрішню архітектуру вузлів або систем шляхом визначення потоків даних між їх функціональними елементами – модулями. Ці модулі визначають процеси генерації, відправки, отримання пакетів від інших модулів і визначають функції з обробки даних всередині вузлів. Модулі репрезентують додатки, протоколи різних логічних рівнів, фізичні ресурси такі як, буфери, порти і т.д.

Взаємодію з оточенням і функціональні можливості модулів описують в редакторі процесів ( Process Editor). Цей редактор використовує кінцеві цифрові автомати (FSM) , що дозволяє описувати мережеві протоколи з будь-яким ступенем деталізації. Стан цифрових автоматів і переходи графічно репрезентують оточення і процеси взаємодії, де активний стан процесу змінюється в залежності від події на вході процесу (автомата). Стан FSM і можливі переходи до інших станів графічно репрезентують процес. Кожний стан процессу включає C/C++ код для управління. Для програмування протоколів є багато бібліотек. Створити свою, з особливими можливостями, бібліотеку не є проблемою.

**Модулі OPNET.** У складі OPNET є різноманітні модулі, що дозволяють, наприклад, виконувати корекцію діаграми спрямованості антени для бездротової комунікаційної системи, чи змінювати спосіб модуляції сигналів, або вносити корективи у формат пакета,

або в організацію бази даних, що має містити результати імітації для їх подільшої обробки і аналізу.

OPNET також підтримує імітацію бездротових мобільних вузлів, в тому числі і супутникові системи. Реалізація мобільних вузлів принципово може бути досягнута за рахунок одного з трьох способів:

1. Мобільна траєкторія. Вузол рухається у відповідності до попередньо визначеної траєкторії, що може бути накреслена або задана крок за кроком.
2. Мобільний вектор. Вузол рухається у відповідності до попередньо визначеного вектора, що задається разом з іншими атрибутами вузла., і який може бути скорегований протягом процесу імітації.
3. Обчислення координат вузла. Окремий модуль постійно обчислює координати вузла у відповідності з заданою моделлю.

**Процедура імітації.** З допомогою інструмента симуляції є можливим об'єднати декілька атрибутів низького рівня для створення серії ітерацій моделювання. В основі процесу лежить отримання певних результатів як функції від часу імітації з урахуванням потрібної статистичної точності. При накопиченні статистичних даних бажано контролювати завантаження до роботи окремих імітацій з різними початковими значеннями для програм-генераторів довільних чисел в заданих діапазонах. Втрата пакетів або вузлів, пошкодження окремих бітів і виникнення помилок при передачі пакетів, запити від програм-додатків, що моделюються у відповідності до заданої функції щільності розподілення – все це можливо моделювати без проблем. Анімацію роботи комп'ютерної мережі є можливим завантажити до виконання після процедури імітації, а мінімальний часовий крок анімації складає одну піко секунду.

Інструменти аналізу результатів імітації забезпечують швидку обробку збережених данних за результатами моделювання і їх оперативну обробку з метою компактного відображення у вигляді графіків і спеціальних діаграм.

Проектувальники комп'ютерних мереж постійно стикаються з проблемою підвищення рівня складності комунікаційних протоколів і збільшенням масштабів розгортання мереж. Традиційні підходи з використання традиційного програмного забезпечення до проектування таких мереж не мають успіху. Сьогодні сукупність програмних продуктів від OPNET дозволяє ефективно аналізувати продуктивність протоколів і технологій в моделях мережевої інфраструктури реалістичного масштабу. Так, програмне забезпечення дослідження і проектування мереж (Network R&D) від OPNET є інструментом для:

- створення нових протоколів і технологій бездротового зв'язку;
- оцінки рішень щодо вдосконалення існуючих протоколів;
- тестування і демонстрації результатів розроблених технологій на реальних сценаріях перед початком промислового використання;
- підвищення продуктивності етапів досліджень і проектування з метою скорочення часу виведення продукції на ринок.

Фактично, комплекс программ моделювання Network R&D базується на використанні програми OPNET Modeler як основного інструмента і сукупності модулів з імітації бездротових мереж (Wireless suite) і модулів захисту даних (Defense additions).

Моделюючий комплекс забезпечує додаткові функції з реєстрації даних в процесі імітації процесів в прискореному масштабі часу (ACETM Analyst):

- фіксацію маршрутів пакетів для додатків, що працюють в реальному мережевому або тестовому оточенні;
- визначати модель даних , що буде реєструватись для додатків;
- створювати моделі для нових мережевих додатків.

В процесі імітації процесів в реальному масштабі часу компонента OPNET (System-in-the-Loop) дозволяє:

- тестувати прототипи обладнання і програмного забезпечення;

- вивчати параметри взаємодії прототипів додатків з метою розгортання їх в майбутньому на імітує мій топології мережі.;
- аналізувати продуктивність нових протоколів, що досліджуються в імітованій мережі шляхом використання даних реального мережевого трафіку;
- створювати можливість віртуального тренінгу для пристроїв або для додатків, що безпосередньо взаємодіють з інфраструктурою, яка містить багато пристроїв робота яких імітується.

Моделюючий комплекс має в своєму складі інструментарій для імітації бездротових мереж, який забезпечує гнучке і масштабоване моделювання широкого діапазону досконалих технологій оточення для прискорення прогону імітаційної моделі. Характеристики бездротової мережі інтегровані до моделей протоколів вищих рівнів, що забезпечує можливість моделювання різноманітних аспектів бездротового доступу, включаючи:

Радіочастотне розповсюдження. Є можливість моделювання спеціальних ефектів, що виникають при розповсюдженні радіосигналів: дифракція від місцевих перешкод, затухання сигналів, вплив атмосферних явищ на ослаблення сигналів. Також підлягають налаштуванню:

- сигнали процесів модуляції і демодуляції;
- інтерференція сигналів і глушення сигналів при прийомі;
- характеристики передавача і приймача;
- параметри мобільного вузла, включно з рубежами передачі повноважень;
- взаємодія з дротовими транспортними мережами.

Моделюючі програми (Modeler Wireless Suite) and Modeler Wireless Suite for Defense імітують бездротовий зв'язок з використанням модульованих сигналів і сигналів Free-Space. Всі основні параметри таких сигналів можуть бути налаштованими і спроектовані для ефективного обчислення спеціальних ефектів, що виникають в радіомережах: втрата зв'язку, різноманітні типи поляризації сигналів, пошкодження ліній передачі даних, моделювання шуму і інтерференції сигналів, спеціальні ефекти.

Програми моделювання бездротового зв'язку використовують програмні модулі Digital Terrain Elevation Data (DTED) and Digital Elevation Map (DEM) для обчислення характеристик сигналів, що розповсюджуються через ефір з урахуванням їх відбивання, дифракції, абсорбції. Обчислення характеристик бездротових сигналів виконується на основі алгоритмів фактично стандарту США для моделювання сигналів (Terrain Integrated Rough Earth Model) та даних тривимірних карт місцевості та міст з урахуванням перешкод для розповсюдження радіо сигналів.

## ВИСНОВКИ

Багато проблем розробки складних комунікаційних систем можуть бути розв'язані за допомогою інструментів імітаційного моделювання. Імітація процесів в комунікаційних мережах має дуже ефективний результат, як відповідь, на питання «що буде якщо?».

Реальні завдання дослідження з метою забезпечення зв'язку в складних умовах можливо розв'язати за допомогою моделюючих інструментів OPNET. Наявність розроблених і практично відпрацьованих моделей протоколів, моделей вузлів, моделей різнотипних каналів зв'язку, форматів пакетів (для Ethernet, FDDI, ATM, OSPF і т.д.), що вкладені сьогодні у програмні модулі від OPNET.

Можливо використовувати попередньо розроблені і відпрацьовані моделі об'єктів від OPNET для розв'язання наших практичних проблем з дослідження процесів в комунікаційних мережах або розробити власні моделі спеціальних протоколів або нестандартних вузлів мережі, що досліджується. Досвід практичного використання моделюючих програм OPNET висвітлив принципову адекватність базових моделей, високу ефективність засобів створення, тестування і імітації процесів в комунікаційних мережах.

## Список літератури

1. *Бертсекас Д., Галлагер Р.* Сети передачи данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 544 с.

*Л.С. Онокой, доктор социологических наук*
*(Российский государственный социальный университет, Российская Федерация, Москва)*

# ЭЛЕКТРОННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ И РЕШЕНИЯ

*Аннотация. Статья посвящена проблемам информатизации современных университетов, в частности, проектированию электронных университетов, понимаемых автором как результат интеграции имеющихся и вновь разрабатываемых Web-порталов, информационных систем и ресурсов, обеспечивающих информационно-аналитическую поддержку всех видов деятельности современного университета.*

В условиях нарастающего экономического кризиса высшая школа России ищет новые решения в построении эффективной системы образования. Определяющими для такой системы являются научно-исследовательская и научно-внедренческая деятельности университетов.

В рамках этих видов деятельности в учебных заведениях ведутся проектные работы по созданию систем электронных университетов. До настоящего времени понятие электронного университета имело достаточно узкое толкование, а именно - виртуальное учебное заведение, реализующее обучение с использованием дистанционных технологий посредством различных способов электронной передачи (кабель, ультракороткие волны, спутник, оптоволоконный кабель, и т. п.) учебно-методических материалов учащемуся. Для электронного университета были характерны:

- территориально-рассредоточенный контингент учащихся;
- неоднородные условия занятости учащихся;
- пространственное разделение преподавателя и учащегося;
- частое двустороннее общение и периодические встречи с преподавательским составом и другими учащимися;
- независимость учащихся, а также индивидуальных подход в процессе обучения;
- использование различных электронных средств связи (например, радио, ТВ, телефон и компьютер), а также печатных материалов для проведения курсов и т.д.

В настоящее время в условиях информатизации и технологизации системы образования понятие «электронный университет» получило новое расширенное толкование. В основе формирования информационной системы «Электронный университет» лежат следующие современные тенденции:

- сфера образования России значительно продвинулась в части интеграции в мировое образовательное пространство;
- значительное развитие получили образовательные технологии на основе Интернет;
- сформировалась и получила развитие доктрина дистанционного образования.

Информационная система «Электронный университет» предполагает создание единого информационного пространства университета и его филиальной сети путем формирования корпоративной коммуникационной инфраструктуры, использования современного цифрового оборудования, компьютерной техники и программных средств, с последующей интеграцией информационных систем (ИС) университета и его филиалов в общий комплекс взаимосвязанных программных продуктов и технических решений.

Информационной системы «Электронный университет» включает следующие основные компоненты:

- информационные ресурсы, содержащие данные, сведения и знания, зафиксированные на соответствующих носителях информации;
- организационные структуры, обеспечивающие функционирование и развитие единого информационного пространства, в частности, сбор, обработку, хранение, распространение, поиск и передачу информации;

- среда информационного взаимодействия пользователей и подразделений, обеспечивающая им доступ к информационным ресурсам на основе соответствующих информационных технологий, включающая программно-технические средства и организационно-нормативные документы.

Организационные структуры и среда информационного взаимодействия образуют единую информационную инфраструктуру.

Электронный университет предполагает системную интеграцию имеющихся Web-порталов, информационных систем и ресурсов, разработку и внедрение новых информационно-коммуникационных систем, функционально охватывающих все сферы деятельности. Таким образом, система дистанционного обучения становиться лишь только малой частью современного электронного университета.

Информационная система «Электронный университет» является оптимальной комбинацией новейших информационных технологий и современных тенденций управления вузом, она позволяет решать следующие задачи:

- автоматизация всех направлений деятельности вуза;
- комплексный мониторинг деятельности вуза;
- менеджмент качества всех видов деятельности;
- моделирование и прогнозирование управленческих процессов.

Информационная система «Электронный университет» состоит из двух частей - открытой и закрытой. К открытой части имеют доступ все желающие через Интернет. К закрытой части, предназначенной для служебного пользования, доступ предусматривается авторизованный доступ. Для идентификации при этом используется как логин и пароль, так и закрытый ключ электронной цифровой подписи. Информация в закрытой части передается и хранится в зашифрованном виде.

Полноправными участниками системы «Электронный университет» являются преподаватели и студенты университета, которые после регистрации получают право доступа к информационным ресурсам системы.

Информационная система «Электронный университет» является функционально полной (Рисунок 1). Она обеспечивает:

1. В сфере управления
   - внедрение системы системного (проектного) подхода управления университетом и системы поддержки принятия управленческих решений, в том числе на основе проведения электронных и реальных опросов, экспертных оценок, анализа статистических данных и т.д.;
   - создание подсистемы для каждого структурного подразделения университета, преподавателя, студента, выпускника;
   - реализация внутреннего и внешнего электронного документооборота (в том числе и с грифом «конфиденциально») путем обмена электронными документами, подписанными электронной цифровой подписью и имеющими юридическую силу;
   - шифрование передаваемой и хранимой информации с использованием средств криптографической защиты информации, сертифицированных ФСБ РФ;
   - проведение заседаний Ученого совета, любых совещаний и конференций в электронном виде, а также принятия коллегиального решения, осуществляя процедуру голосования в режиме удаленного доступа, с использованием средств ВКС;
   - создание комплексного многофункционального инновационно-образовательного портала вуза, в рамках которого структурные подразделения будут иметь Web-порталы с такими же функциональными возможностями, как и основной портал, а преподаватели и студенты – личные интерактивные Web-сайты;
   - организация форумов с однозначной идентификацией участников;
   - осуществление приема граждан по любым вопросам руководством вуза, преподавателями, студентами и другими зарегистрированными участниками системы

с обеспечением конфиденциальности путем шифрования информации, а официальности - путем подписания электронной цифровой подписью;

- создание электронной системы подбора кадров, в том числе и на конкурсной основе, а также трудоустройства выпускников;

2. В учебной деятельности
   - создание и использование электронных учебно-методических комплексов по всем читаемым дисциплинам;
   - разработка системы дистанционного образования для реализации программ подготовки к поступлению в ВУЗ, а также программ среднего, высшего и дополнительного профессионального образования;
   - внедрение дистанционных технологий во все формы обучения (очная, очно-заочная, заочная);
   - создание системы компьютерного тестирования для промежуточного и итогового контроля знаний студентов;
   - создания эффективной системы организации обучения по индивидуальному графику (плану);
   - использование электронных имитационных тренажеров для получения студентами практических навыков;
   - использование электронной системы для сопровождения преподавателями процесса прохождения студентами практики;
   - создание онлайновых сообществ студентов, выпускников, преподавателей, ученых и др.;
3. В научно-внедренческой деятельности
   - создание ИТ-технопарка и электронного бизнес-инкубатора;
   - создание системы оказания услуг, в том числе консалтинговых, в удаленном режиме;
   - создание электронной библиотеки, журнала, газеты и различных баз данных;
   - публикация научных трудов сотрудников и студентов в электронном научном издании, включенном в список ВАК.

**Создание электронного университета преследует своей целью объединить информационно-телекоммуникационные системы подразделений, функционирующие сейчас, в основном, в интересах данных подразделений и без необходимого их взаимодействия, что приводит к дублированию работ, избыточности в сборе первичной информации, удорожанию разработок и эксплуатации систем. В результате создания электронного университета будет преодолена разобщенность источников информации, улучшен обмен информацией и доступ к ней, расширен информационно-коммуникационный потенциал вуза.**

**Электронный университет обеспечивает прозрачность деятельности вуза для его руководящего и профессорско-преподавательского состава, сотрудников и студентов, а также для российского и международного образовательного сообщества.**

## Список литературы


1. *Соловов А.В.* Электронное обучение: проблематика, дидактика, технология. – Самара: «Новая техника», 2006.
2. О системе "Электронный университет". http://www.roseis.ru/REOS/giep/giep.nsf/html/INFORMACIONNAYASISTEMALEKTRONNIUNIVERSITET

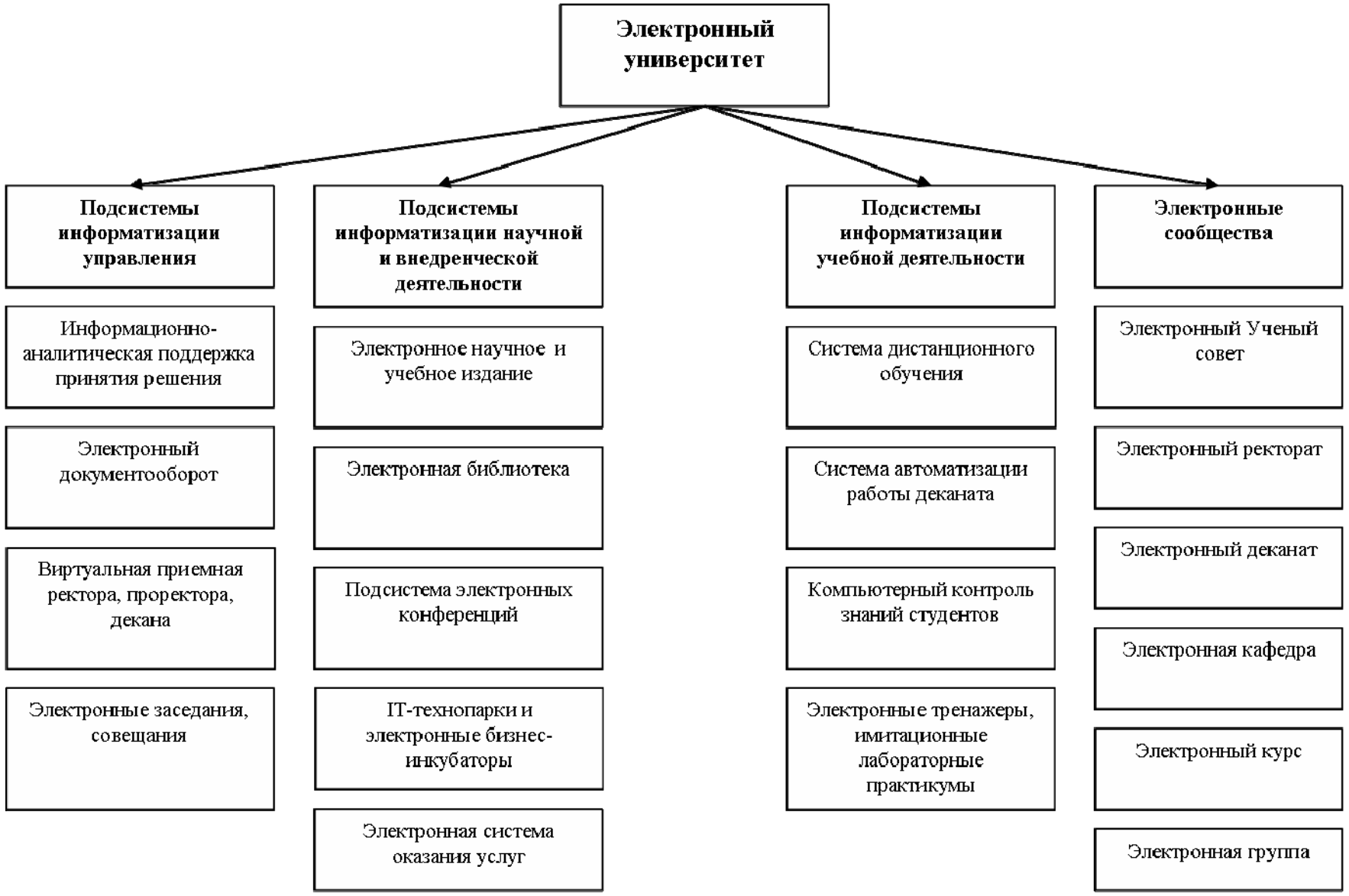



**Рисунок 1. Структурно-функциональная схема информационной системы «Электронный университет**

УДК 519.876.5: 004.738.5

*М.В. Потапов, аспирант*
*(Одесский национальный политехнический университет, Украина)*

# АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ МАТРИЦЫ ТРАФИКА СОВРЕМЕННОЙ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ СЕТИ

*Знание матрицы трафика (МТ) Отправитель-Получатель (ОП) позволяет оценить индивидуализированный трафик в некоторый временной дискет. Предлагаемый алгоритм основан на применении модулируемого Пуассоновским процесса Маркова, Байесовской техникой аппроксимации Метрополиса-Гастингса, алгоритма Гастингса, метода Монте-Карло для цепей Маркова.*

Актуальность исследований оценки трафика современных сетей не вызывает сомнений. Управление высокоскоростными сетями требует подробного знания статуса компонент сети, сбоев и проблем на маршрутизаторах, конфигурацию брандмауэров, нагрузку на каналах связи, задержки и статистику по таймаутам, матриц трафика и многого другого. В последнее время появляется всё больше и больше научных проектов, ориентированных на решение данных вопросов, но тем не менее эта отрасль остаётся слабо изученной, что имеет свои причины. Прежде всего, пассивный мониторинг сетевых пакетов на ключевых точках обмена трафиком в сетях обычно затруднен в силу многих факторов, причем необязательно связанных с оборудованием. Тут играет роль приватность информации, ведь обладая замерами трафика внутри сетей провайдеров можно вычислить топологию их сети и роль различных машин, подключенных к этой сети, что сильно облегчит задачу при, например, взломе. Поэтому сетевые операторы и не спешат делиться подобной информацией с учёными. Единственной доступной информацией является статистика маршрутизаторов, доступная в ряде случаев через SNMP-протокол, что не даёт никакой информации по матрицам трафика, а лишь некоторое представление по загрузке сети. Мониторинг крупных коммуникационных систем является необходимым минимумом для диагностики всей структуры сети и эффективного управления. При этом, самый распространенный подход, используемый для решения этой задачи, основан на детальном анализе трафика, что сильно нагружает роутеры и в следствии этого обычно является недоступным в высокоскоростных коммерческих сетях. По сути матрица трафика (МТ) [1, 2] оценивает информационные потоки между парами Отправитель-Получатель. Оператор сети может изменять виртуальные маршруты соединения с целью оптимального потребления трафика пользователями, Контролируя трафик матрицу можно избежать различные негативные состояния сети.

Метод оценки МТ заключается в частичном задании матрицы трафика (в векторном представлении) на основе данных реальных измерений. Матрица $A$ разбивается на две части: $A_1$ и $A_2$, где первая матрица имеет одинаковую размерность рядов и столбцов. Аналогично, вектор трафика разбивается на две части – $X_1$ и $X_2$. Задаваясь значениями $X_2$, представляется возможным оценить вектор $X_1$. при использовании:

$$X_1 = A_1^{-1}(Y - A_2X_2) \tag{1}$$

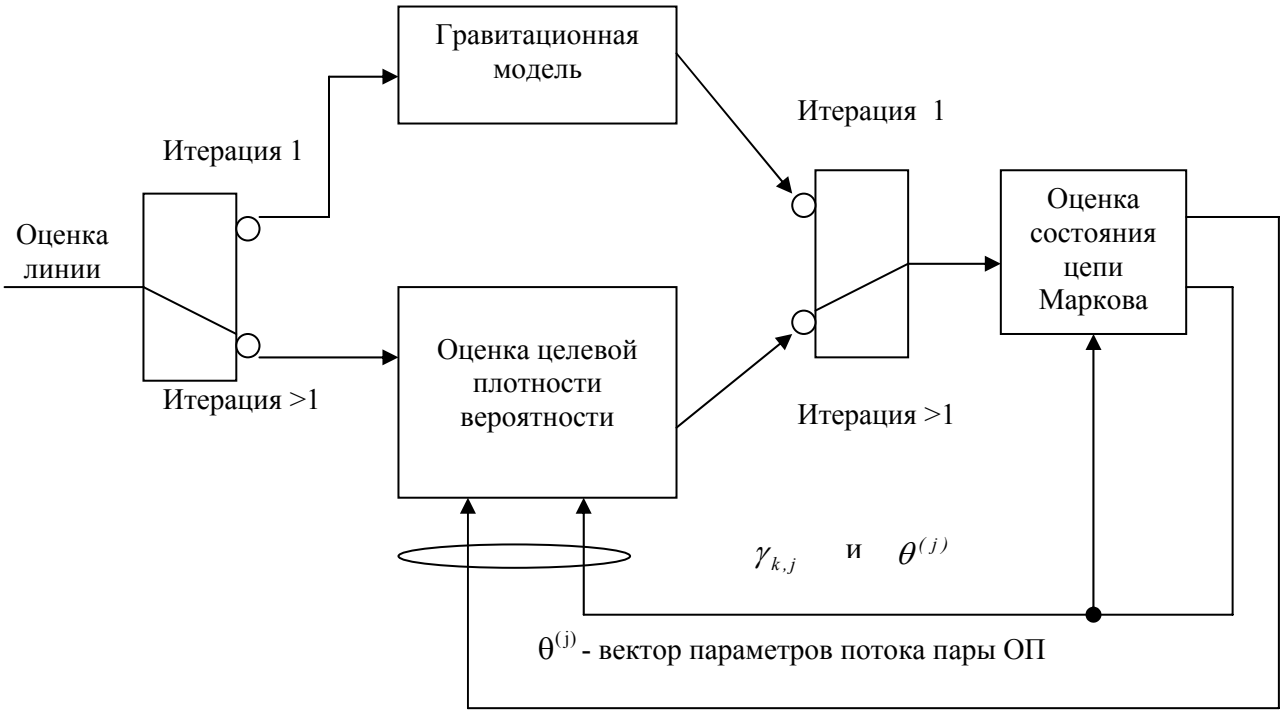
где $X_1$ - оценки трафика, которые вычисляются; $X_2$ - набор случайных величин.

Задаваясь набором случайных переменных $X_2$, представляется возможным найти значение второй части (1) $X_1$, и таким образом определить условную вероятность $p(X_1 \mid X_2, Y)$. Для определения условной вероятности $p(X_1 \mid X_2, Y)$ используем алгоритм Метрополиса [3, 4]. На каждой итерации алгоритма генерируется новая оценка вектора $X_2$, которая используется для уточнения значения вектора $X_2$. В качестве инициализирующей процедуры используем корректированную гравитационную модель

(ГМ)[5], Использование ГМ с коррекцией позволит инициализировать первую итерацию таким образом, что сходимость алгоритма будет существенно выше и точность оценки может на порядок отличаться от оценки, полученной без соответствующей процедуры инициализации. Для каждой итерации изначально используется итерационный ЕМ-алгоритм [6], результаты которого подаются на вход блока, реализующего алгоритм Метрополиса-Гастингса. Для моделирования целевого распределения используется Пуассновская статистика. Блок схема, отображающая итеративную процедуру разработанного метода оценки МТ, приведена на рис.2.

Использование метода управляемых Марковских процессов позволяет привнести в модель динамические свойства. Учитывается статистическая зависимость выборок трафика ОП-пары в различные моменты времени, что позволяет улучшить точность оценки МТ. Данное улучшение достигается за счет взаимодействия двух блоков модели (рис.2).

В первом блоке оценки целевой плотности вероятности применяется метод Метрополиса-Гастингса. Отдельные выборки оцениваются одновременно, но считаются независимыми во времени, т.е. для трафика $Y_k$ в $k$-ый момент времени каждое измерение в векторе трафика ОП-пары $X_k = (x_{k,1}, x_{k,2}, ..., x_{k,c})$ считается независимым. Аналогично во втором блоке реализации управляемого Марковского процесса являются независимыми, т.е. выборки вектора состояния цепи Маркова $Z^{(j)} = (z_{1,j}, z_{2,j}, ..., z_{K,j})$, соответствующие трафику $j$-ой ОП-пары, оцениваются одновременно, но параметры оценок являются независимыми от параметров оценки трафика для другой ОП-пары. Оценка вероятности $\gamma_{k,j}$ отображает вероятность того, что $z_{k,j} = s$, а вектор параметров $\theta^{(j)}$ для $j$-ой ОП-пары соответствует параметрам вероятностей перехода цепи Маркова.




$\gamma_{k,j}^{t}$ - компоненты распределения цепи Маркова (ЦМ)

Рис.2. Блок-схема метода оценки МТ

В блоке оценки состояния цепи Маркова рассчитывается вероятностная оценка трафика ОП-пары в различные временные дискреты. Плотность вероятности является суперпозицией плотностей вероятности двух Пуассоновских процессов:

$$p(x_{k,j}) = \frac{\left[\gamma_{k,j}(1)(\lambda_1^{(j)})^{x_{k,j}} exp(-\lambda_1^{(j)}) + \gamma_{k,j}(2)exp(-\lambda_2^{(j)})(\lambda_2^{(j)})^{x_{k,j}}\right]}{(x_{k,j}!)} \quad (2)$$

Оправданность использование в качестве исходного случайного процесса с Пуассоновским распределением необходимо будет проверить методом численного моделирования с использованием данных измерения реальной сети. Возможно, что потребуется дополнительная коррекция, т.е. использование других статистик. Отметим, что $\gamma_{k,j}(s), s = 1, N$ является вероятностью того, что $z_{k,j}$ находится в состоянии $s$ при условии оценки трафика $x_{k,j}$ для $j$-ой пары:

$$\gamma_{k,j}(s) = P(z_{k,j} = s \mid x_{-k}^{(j)}), \quad (3)$$

где $x^{(j)} = (x_{1,j}, x_{2,j}, ..., x_{K,j})^T$ оценка трафика $j$ -ой ОП-пары в дискреты времени $k=1,K$.

Оценка величины $\gamma_{k,j}$ для управляемого Марковского процесса рассчитывается как:

$$\begin{aligned} &\gamma_{k,j}(s) \propto p(z_{k,j} = s, x_1^{(j)}, ..., x_{k-1}^{(j)}, x_{k+1}^{(j)}, ..., x_k^{(j)}) \\ &= \sum_{s'} p(x_1^{(j)}, ..., x_{k-1}^{(j)}, z_{k-1,j} = s') P(z_{k,j} = s \mid z_{k-1,j} = s') p(x_{k+1}^{(j)}, ..., x_k^{(j)} \mid z_{k,j} = s) \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом коррекции для скрытой цепи Маркова (СЦМ) получим:

$$\gamma_{k,j}(s) \propto \left[\sum_{s'} \alpha_{k-1,j}(s') p_{s's}^{(j)}\right] \beta_{k,j}(s) \quad (5)$$

Выражение (5) можно преобразовать к виду:

$$\gamma_{k,j}(s) \propto \frac{\alpha_{k,j}(s)\beta_{k,j}(s)}{p_s^{(j)}(x_k^{(j)})}, \quad (6)$$

где $p_s^{(j)}(\bullet)$ – плотность вероятности компоненты $s$ модели на основе СЦМ, которая соответствует трафику $j$-ой ОП-пары.

Суть используемого метода заключается в учете взаимозависимости трафика в различные временные дискреты. Полагается, что в рамках модели на основе СЦМ цепи оценка $\gamma_{k,j}(s)$ обеспечивает учет всех возможных состояний $x_{-k}^{(j)}$ в зависимости от величины $x_k^{(j)}$. Итерации повторяются до тех пор, пока новая итерация не будет уточнять последующую. Другими словами, параметры управляемой цепи Маркова, отображающие трафик $j$-ой ОП-пары, оптимизируются посредством серии итераций. В итоге максимизируется оценка вектора $\theta^{(j)}$ СЦМ для $j$-ой ОП-пары.

На входе блок-схемы, отображающей реализацию разработанного метода, могут быть измерения суммарного трафика $Y_k$. На первой итерации данная эмпирическая оценка поступает на вход гравитационного алгоритма для получения инициализирующей оценки

МТ. Поэтому на вход второго блока оценки состояния цепи Маркова поступают не выборки $x_{k,j}, k = 1,...,K$ для каждой ОП-пары, а их оценки $\hat{x}_{k,j}$.

Для каждой *j* –ой ОП-пары рассчитывается плотность распределения $x_{k,j}, k = 1,...,K$ в соответствующие временные дискреты. При использовании управляемых Марковских процессов рассчитываются величины $\gamma_{k,j}(s) = P(z_{k,j} = s \mid x^{(j)})$ и вектор параметров $\theta^{(j)}$. Параметры распределения $x_{k,j}, k = 1,...,K$ возвращаются на вход блока оценки для ее уточнения. Очевидно, что далее необходимо апробировать разработанный метод посредством численного моделирования и с использованием данных экспериментальных измерений для сравнения и оценки точности.

## Заключение

Анализ вычислительной громоздкости на основе оценки числа итерационных циклов для достижения локальных максимумов оценки трафика продемонстрировал в ряде случаев неудовлетворительную скорость сходимости. Даже при N=10 000 приемлемого значения нормированного среднеквадратического отклонения оценки модели от реального измерения достичь не удавалось.

Наличие нескольких отрицательных оценок нормированного среднеквадратического отклонения оценки модели от реального измерения свидетельствует о необходимости внесения коррекции в гравитационную модель, которая используется в разработанном методе для генерации входной итерации на основе экспериментальных данных. Используемая гравитационная модель не является рабочей при резких переходах объема трафика реальной сети.

Получен важный вывод о том, что применение управляемой скрытой цепи Маркова для задачи прогнозирования трафика современной высокоскоростной сети не удовлетворят требованиям точной оценки и уменьшения вычислительной сложности прогнозирования. Получен вывод о необходимости внесения дальнейшей коррекции в статистическое описание модели, как впрочем, и в итерационный алгоритм оптимизации оценки.

На сегодняшний день не существует единой методики для расчета, прогнозирования и анализа трафика мультисервисных сетей. Для достижения приемлемой точности модели необходимо комбинировать различные подходы, применять адаптированные с учетом специфики задачи итерационные алгоритмы.

## Список литературы


1. *C. Tebaldi , M. West.* Bayesian Inference of Network Traffic Using Link Count Data. J. of the American Statistical Association., pp. 557–573, June 1998.

2. *Y.Vardi,* “Estimating Source-Destination Traffic Intensities from Link Data”, Journal of the the American Statistical Association, 91(433), March 1996.

3. *Chib, S., Greenberg, E.* Understanding the Metropolis-Hastings Algorithm. The American Statistician, Vol. 49, No. 4, 1995, 327-335.

4. *Gelman, A., Roberts, G.O., Gilks, W.R.* Efficient Metropolis Jumping Rules. Bayesian Statistics 5, Bernado, J.M., Berger, J.O., Dawid, A.P., Smith, A.F.M.(eds), 1996, 599-607.

5. *І.І. Маракова, М.В. Потапов*, «Удосконалення точності гравітаційного методу оцінки трафіку інтернет-мережи», "Системи обробки інформації", ISSN 1681-7710.

6. *Jamshidian, Mortaza and Jennrich, Robert I. "Acceleration of the EM Algorithm by Using Quasi-Newton Methods,"Journal of the Royal Statistical Society, Ser. B , 59, 569-587, 1997.*

УДК 519.652+519.254

*П.О. Приставка, д.т.н.,*
*О.Г. Чолишкіна*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ОБРОБКИ ЦИФРОВАНИХ ЗОБРАЖЕНЬ «GREEN GERBERA»

*Розроблено програмне забезпечення (ПЗ) «Green Gerbera» для обробки цифрованих зображень. В ПЗ реалізовано процедури субполосної фільтрації, контрастування, масштабування, цифрової стабілізації та інш. за використанням лінійних операторів на основі локальних поліноміальних сплайнів двох змінних близьких до інтерполяційних у середньому.*

**Постановка проблеми**. У багатьох прикладних галузях науки і техніки інформація про об'єкти досліджень поступає у вигляді цифрованих зображень. Для обробки та аналізу такої інформації бажано забезпечити візуальну якість зображення, яка може втрачатись через незадовільні умови її отримання, недосконалості систем реєстрації та передачі інформації, появу різного роду завад. Сучасний рівень інформаційних технологій представлення зображень у цифрованому вигляді потребує відповідного програмного забезпечення (ПЗ) математичної обробки, редагування та аналізу. Останніми роками фактично кількаразово збільшились розміри зображень, що можуть бути збережені при фіксації на сучасні фотокамери, отже було збільшено й розрішення знімків. Подібне відсікає можливості застосування практично усіх відомих методів [1], наприклад, субполосної фільтрації зображень – адже фільтрів з масками 3x3 або 5x5 пікселів недостатньо, щоб обробляти зображення з низькою деталізацією, а такими (через розміри) варто вважати більшість сучасних цифрових фото. Актуальною задачею є стабілізація цифрованих зображень, тобто, усунення випадкової вади, спричиненої мікро-рухом приладів фіксації. Натепер таку задачу вирішують, на загал, апаратними засобами або ж пропонують можливість покращення різкості зображення за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення із закритим кодом. Вартою уваги є й задача масштабування цифрованих фото за використанням методів зміни розміру зображень: високоточні процедури, процедури з контрастуванням, згладжуванням, зміна розміру з високою швидкодією (real-time методи). Зазначені різновиди задач масштабування потребують реалізації локальних методів апроксимації на основі фінітних функцій та їх часткових випадків. Як відмічалось вище, важливим чинником в таких методах є ширина локального носія , що потребує розробки нових відповідних методів, створення нової інформаційної технології обробки зображень та реалізації її в програмному забезпеченні.

**Аналіз останніх досліджень.** На сучасному ринку інформаційних технологій представлено велику кількість програмних продуктів, які забезпечують обробку цифрованих зображень. Не зменшуючи загальності відмітимо такі: Nero Photo Show Deluxe, ACDSee Photo Manger, Microsoft FotoFilter, SAI, Color Photo Paint, Color Paint Shop Pro, Adobe Photoshop, MatLab та інші.

Деякі із згаданих програм призначені задля каталогізації, запису DVD-альбомів, створення музичних слайд-шоу (Nero Photo Show Deluxe, ACDSee Photo Manger, тощо) [2]. В якості функцій обробки пропонується: прибирання ефекту «червоного ока», урізування, оберти, можливість додавання тексту та музики, деякі художні фільтри. В таких програмах, як Microsoft FotoFilter, SAI (компанія SYSTEMAX), XnView, представлено достатньо широкий вибір різноманітних фільтрів для обробки, покращення якості та створення ефектів. Ці програми невеликого розміру, швидкодієві, тому вони корисні для починаючих користувачів, які бажають покращити зображення, накласти ефекти цифрового живопису, тощо [3].

Відомими та функціонально насиченими програмними продуктами, які призначені для професійної обробки цифрованих зображень, вважається Adobe Photoshop, компанія Adobe та його конкуренти компанії Color - Color Photo Paint, Color Paint Shop Pro. Згадані програми пропонують до використання цілі сім'ї фільтрів (згладжувальних, ладнання різкостей, художніх фільтрів, ін.). Функціональність основної програми можливо розширювати за рахунок встановлення додаткових плагінів задля забезпечення особливих вимог користувача щодо фільтрації. Розробники також пропонують автоматичну корекцію зображення (автоматичне налаштування рівня яскравості за даними гістограми), для збільшення (зменшення) розмірів зображення користувач може вибрати варіанти математичного апарату: бікубічна інтерполяція, білінійна, «по сусідніх», тощо [4; 5]. Основним недоліком програм цього класу є великий розмір та висока вартість ліцензійних версій. Закритий програмний код, у свою чергу, обмежує користувачів у розширенні функціональних можливостей, залежно від конкретних нестандартних задач опрацювання, що можуть виникати в дослідницькій практиці.

Інший типовий приклад - пакет програмних продуктів MatLab, який являє собою потужний інструмент, що розроблено для персоналу технічних професій та інженерів для вирішення суто математичних та прикладних задач. Зокрема, для обробки цифрованих зображень розробники пропонують скористатись наступними наборами інструментів: Image Processing Toolbox (обробка зображень), Wavelet Toolbox (вейвлет перетворення) , Filter Design Toolbox (система проектування, імітації та аналізу цифрованих фільтрів) [6]. До переваг пакету слід віднести можливість створювати та компонувати фільтри на базі відомих. До недоліків - відсутність компілятора в машинний код, незручне стикування з іншими мовами програмування, висока ціна (адже пакет є суто комерційним), тривале освоювання для непідготовленого користувача. За фактом, неможливо створювати автоматизовану систему обробки зображень, яка б характеризувалась усіма властивостями програмного продукту.

Відмітимо ще один клас програмних продуктів обробки цифрованих зображень, які розроблені для вузькоспеціалізованих потреб та не призначені для широко користування, тому що ці комерційні продукти є власністю приватних компаній. Наприклад, для вирішення задачі дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) – сім'я програм ArcGIS, яка базується на ГІС-платформі ESRI (призначена для обробки растрових зображень великого розміру, у тому числі космічних знімків); ERDAS IMAGING Professional (комерційне розроблення американської фірми Leica Geosystems, яке створене для аналізу даних ДЗЗ); САДКО (програмний продукт розроблений в Росії та призначений для обробки й аналізу аєро- та космо-знімків земної поверхні), програмний комплекс SKANMAGIK (призначений для перегляду та обробки зображень Землі з космосу; інженерно-технологічний центр «СканЄкс»), тощо.

Слід навести ще один важливий аргумент на користь розробки власного ПЗ. При одержанні нових методів та відповідних програмних процедур дослідник має переконливо аргументувати їх доцільність при використанні. Шляхом вирішення даного питання є організація та проведення обчислювальних експериментів, що об'єктивно можливо лише в рамках власноруч створеного програмного коду.

Із врахуванням усіх зазначень, можна зробити загальний висновок про доцільність розробки ПЗ ЦОЗ, що реалізує нові прогресивні методи обробки, спрямовані на розв'язання сформульованих задач. В такій постановці задача створення нового відповідного ПЗ є актуальною та своєчасною.

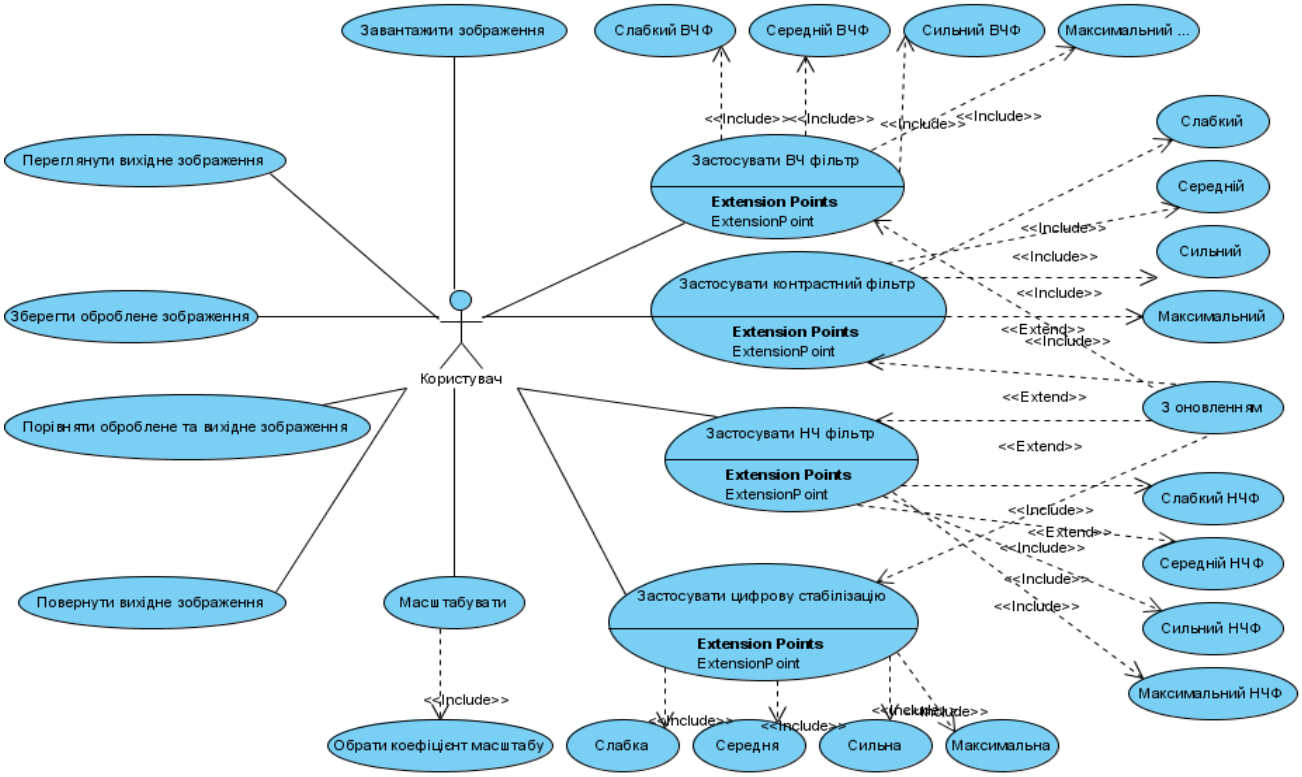
**Виклад основного матеріалу**. Пропонується інформаційна технологія обробки цифрованих зображень, яка заснована на часткових випадках локальних поліноміальних сплайнів, а саме сплайн-операторів двох змінних на основі лінійних комбінацій *B*-сплайнів, 2-го, 3-го, 4-го та 5-го порядку, близьких до інтерполяційних у середньому [7; 8].

Вибір в якості апарату апроксимації операторів, що є близькими до інтерполяційних у середньому обумовлений більш високою стійкістю оцінки наближення за даними, на зразок

цифрованих фото [7 - 9]. Швидкодія опрацювання зображення напряму залежить від кількості математичних операцій процедур обробки, тому є слушним використання саме локальних методів апроксимації поданих у явному вигляді. Найвищу швидкодію демонструють лінійні оператори – як явне розкриття дискретної згортки дискретного (цифрованого) сигналу та послідовності вад або (що майже тотожньо) як часткові випадки апроксимацій з використанням фінітних функцій. Характерною рисою таких операторів є їх локальність, що й дає можливість описати особливості сигналу. За використанням зазначених сплайнів було створено нову інформаційну технологію, до складу якої увійшли авторські методи та процедури [7 - 14], а для автоматизації обробки цифрованих зображень на основі такої технології авторами було створено ПЗ «Green Gerbera».

Основні можливості програми проілюстровано на Діаграмі користування (дігар.1). Як видно з діаграми, вирішення задач фільтрації зображень можливе шляхом застосування фільтрів різної потужності (фільтри, які отримані з частих випадків сплайн-операторів різного ступеня) в залежності від розміру та деталізації зображень Пропонуються низькочастотні, високочастотні (зокрема розділ за порогом) та контрастні фільтри. Ліквідація спотворень, що привнесені мікрорухом камери фіксації, можлива шляхом застосування цифрової стабілізація зображення. Для зміни розміру зображення користувачу пропонується на вибір: зменшення/збільшення вдвічі (як найбільш поширені) та масштабування в довільне число разів (не обов'язково ціле). Після вибору коефіцієнта масштабу (вводиться користувачем в додатковому вікні програми) можливе масштабування звичайне (за допомогою інтерполяції), зі згладжуванням та з контрастуванням. Для зручності пропонується користування опцією «з оновленням», яка дозволяє проводити низку операцій над зображенням без збереження попередніх дій, що дозволяє швидше розглянути всі можливі перетворення та вибрати операцію чи алгоритм, які дозволяють досягти найбільш вдалого результату обробки в кожному конкретному випадку. Також в ПЗ реалізовано процедури покращення яскравості зображення. Можливе виведення на екран гістограми зображення (по компонентах RGB окремо або разом), еквалізація гістограми, тощо.

*Діаграма 1*




Діагр.1 «Діаграма користування»

Після проведення обробки зображення можливе порівняння вихідного та обробленого зображень. Для цього пропонується опція «порівняти та вивести статистику», яка дозволяє продивитись статистику порівняння двох зображень (середнє абсолютної похибки, середнє відносної похибки, *f*-статистику адекватності, PSNR, тощо).Також в ПЗ реалізовано процедури покращення яскравості зображення. Можливе виведення на екран гістограми зображення (по компонентах RGB окремо або разом), еквалізація гістограми, тощо. Вхідними даними для програми є цифрові зображення в форматі JPG та BMP. Результати оброки також можна зберегти у зазначених форматах.

Простий і зручний інтерфейс є дружнім для непідготовленого користувача, пропонується стандартні діалоги, тощо.

**Висновки.** Створене програмне забезпечення дозволяє вирішувати задачі, які виникають при обробці цифрованих зображень, зокрема: субполосна фільтрація, контрастування, цифрова стабілізація, покращення яскравості, тощо. Масштабування цифрованих фото за використанням методів зміни розміру зображень: високоточні процедури, процедури з контрастуванням, згладжуванням, зміна розміру з високою швидкодією (real-time методи). ПЗ «Green Gerbera» може мати застосування при обробці даних томографії, ДЗЗ, даних аерофотозйомки, видавничій справі, тощо. Подальші дослідження припускають реалізацію додаткових функцій програми (небінарне масштабування, стиснення з втратами, усунення ефекту змазу при русі, тощо). Технологічно розроблене програмне забезпечення легко може бути інтегровано у будь-які інші програмні засоби цифрової обробки зображень.

## Список літератури


1. *Грузман И.С., Киричук В.С. и др.* Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. -168 с.
2. Інтернет ресурс: http://www.acdsee.com/
3. Інтернет ресурс: http://photofiltre.free.fr/
4. *Айсман К., Палмер У.* Ретуширование и обработка изображений в Photoshop. – 3-е издан. – М.: Вильямс, 2007.- С.560.
5. Інтернет ресурс: http://www.adobe.com/products/
6. Інтернет ресурс: http://www.mathworks.com/
7. *Приставка П.О.* Поліноміальні сплайни при обробці даних – Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2004. – 236 с.
8. *Приставка П.О., Чолишкіна О.Г.* Дослідження двовимірного поліноміального сплайну на основі В-сплайнів п’ятого порядку / Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій : Зб. наук. праць. - Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту.- 2008. -Т.12. –С.14-27.
9. *Приставка П.О.* Застосування комбінованих фільтрів на основі поліноміальних сплайнів при обробці растрових зображень. Вісн. НАУ. - К.: НАУ.- 2008.-№4. -С. 104-107.
10. *Приставка П.О.* Обчислювальні аспекти застосування поліноміальних сплайнів при побудові фільтрів / Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій.- Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту.- 2006. -Т.10. –С.3-14.
11. *Приставка П.О.* Побудова контрастних фільтрів за використанням поліноміальних сплайнів / Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій.- Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту.- 2007. -Т.11. –С.15-22.
12. *Приставка П.О.* Поповнення послідовностей відліків функцій двох змінних на основі поліноміальних сплайнів / Вісник НАУ.- К.: НАУ.- 2007.-№3-4. -С. 36-39.
13. *Приставка П.О.* Поповнення зі згладжуванням послідовностей відліків функцій двох змінних на основі сплайнів / Математичне моделювання. – 2008. - №1(18). - С.9-12.
14. *Чолишкіна О.Г.* Застосування поліноміальних сплайнів на оснві В-сплайнів п’ятого порядку під час побудови фільтрів / Вісн. НАУ.- К.: НАУ.- 2009.-№1. -С. 214-218.

УДК 629.735.051:004.7 (043.3)

*Е.В. Толстикова*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# АСИМПТОТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ И ЭФФЕКТИВНОСТИ МАРШРУТИЗАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

*При асимптотической оценки времени передачи данных и оценки эффективности маршрутизации в качестве математической модели сети рассмотрена модель направленной диффузии потока данных к узлу сбора информации, т.е. модель управляемого марковского процесса.*

В последнее время беспроводные технологии связи активно развиваются в различных направлениях. Среди них перспективными являются беспроводные сенсорные сети (БСС). Под БСС понимают сеть, состоящую из множества ячеек (mesh) с низкой скоростью передачи данных и сверхнизким энергопотреблением. Такие сети имеют множество применений – для автоматизации зданий, в промышленной автоматике, в системах безопасности и обороны, в системах критичного применения и др. [1,2]

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) состоит из большого количества датчиков, с помощью которых осуществляется сбор информации для решения задач управления в реальном времени внутри определенной области и может обеспечить решения многих информационных задач. Хотя некоторые технологии беспроводных сетей *ad hoc* (*MANET*) применимы к БСС, однако БСС отличаются от мобильных сетей *ad hoc* во многих аспектах. Например, количество узлов в БСС обычно намного больше, чем в *MANET*. Обычные датчики более ограничены в ресурсах мощности, вычислительных возможностях и памяти. Топология развертывания датчиков не предопределяется. Во многих случаях узлы сети являются статическими, топология может меняться часто из-за недостаточной надежности беспроводной связи и погрешностей измерений датчиками.

Более того, *MANET* обычно лишены инфраструктуры, связь между двумя конечными пунктами являются обычной структурой связи. Для БСС же характерно наличие одной (или больше) базовой станции (БС). Обычно все датчики предназначены для того, чтобы считывать датчик локальной среды и, по запросу, отправлять необходимую информацию к базовой станции, являющейся пунктом концентрации БСС и связью, соединяющей БСС с остальным миром.

Важными задачами, которые должны решаться в БСС, являются задачи обеспечения необходимого уровня надежности при сборе и передаче информации и обеспечения соответствующего уровня защиты информации, поскольку беспроводная передача информации между узлами доступна для многих видов вмешательств. Наиболее эффективной стратегией повышения надежности является многопроходное рассредоточение трафика.

Повышение надежности может быть достигнуто ценой чрезмерной избыточности, то есть отправкой большего количества информации, чем необходимо по одному маршруту таким образом, что восстановление первоначальной информации может допускать определенное количество ошибок маршрута или потерянных пакетов информации.

Выбор подходящих и эффективных протоколов многопутевой маршрутизации является определенной проблемой для любой схемы многопутевой маршрутизации. Важной задачей является выбор оптимальной методики многопутевого обнаружения между отдельной парой, определенной исходным адресатом.

Типичной задачей БСС является сбор данных. Базовая станция передает запрос об интересующих данных и каждый узел датчика (или узлы, которые имеют интересующие данные) посылает свои показания назад к базовой станции. Для этой цели базовая платформа датчика Беркли *TinyOS* (*Berkeley's TinyOS sensor platform*) использует протокол указания

пути на основе лавинной маршрутизации *(flooding-based beaconing protocol*). Базовая станция периодически передает обновление маршрута. Каждый узел датчика, получая обновление впервые, ретранслирует обновление и указывает узел, от которого он получил обновление как исходный. Это продолжается рекурсивно, пока каждый узел в сети не ретранслирует обновление и найдет его исходник.

Из этого следует, что каждый узел отправляет пакеты, которые получил или сгенерировал соседнему узлу до тех пор, пока пакеты не достигнут базовой станции. Протокол испускания маяка (*beaconing protocol*) по существу создает широту, сначала строящую дерево с разводкой от базовой станции. Он находит каждому узлу датчика свой оптимальный путь к базовой станции. Однако, надежность и безопасность страдают из-за маршрутизации единственным путем. Отказ одного узла или связи разрушат поток данных от узла непосредственно и всех его дочерних узлов. Точно так же компрометация одного из узлов приведет к утечке информации от этого узла и всех дочерних.

Для использования в подобных приложениях система беспроводной передачи данных должна обладать следующими свойствами:

– низкое энергопотребление (время работы на автономном источнике питания измеряется месяцами и годами);

– скорость передачи данных может быть невысокой (в основном передаются показания датчиков и команды управления);

– номинальная дальность радиосвязи до 10...100 м;

– низкая стоимость элементной базы;

– устойчивость к случайным помехам и к межканальной интерференции;

– возможность создания простых протоколов канального, сетевого и транспортного уровней;

– простота аппаратной реализации.

Кроме того характерными особенностями такой сети являются следующие:

– ячеистая топология с равноправными узлами;

– каждый узел выполняет функции простейшего маршрутизатора;

– использование нескольких маршрутов, выбираемых по усредненным критериям;

– масштабируемость и высокая надежность сети благодаря наличию пучка маршрутов;

– возможна работа всех узлов от автономных источников питания;

– одноразовое применение – автономный узел после полного разряда источника больше не используется, а заменяется на такой же с новым источником.

По существу, БСС представляют собой сети случайного множественного доступа. В качестве математической модели сети, управляемой динамическим протоколом случайного множественного доступа с оповещением о конфликте, рассмотрена модель направленной диффузии потока данных к узлу сбора информации, т.е. модель управляемого марковского процесса [3,4].

Состояние рассматриваемой системы определим вектором $\{k,i\}$, где $k$ – состояние ячейки, а $i$ - число заявок в системе. Его изменение во времени образует однородный двумерный процесс $\{k(t), i(t)\}$ с бесконечным числом состояний. Вероятности состояний определяются выражением

$$P_k(i,t) = P\{k(t) = k, i(t) = i\},\ k = \overline{0,2}\,,\ i = 0,1,2,\ldots \qquad (1)$$

Составим для вероятностей (1) систему уравнений Колмогорова

$$\frac{\partial P_0(i,t)}{\partial t} = -(\lambda+\sigma)P_0(i,t) + \mu P_1(i+1,t) + \frac{1}{a}P_2(i,t),$$

$$\frac{\partial P_1(i,t)}{\partial t} = -(\lambda+\sigma+\mu)P_1(i,t) + \lambda P_0(i-1,t) + \sigma P_0(i,t),$$

$$\frac{\partial P_2(i,t)}{\partial t} = -\left(\lambda+\frac{1}{a}\right)P_2(i,t) + \lambda P_2(i-1,t) + \lambda P_1(i-1,t) + \sigma P_1(i,t),$$

которой определяются распределения вероятностей $P_k(i,t)$

Пусть $P(i,t) = \{P_0(i,t), P_1(i,t), \ldots, P_{M-1}(i,t)\}^T$ - вектор-столбец состояний сети в момент времени $t$, где $M$ - число возможных состояний. Тогда систему уравнений Колмогорова можно записать в векторно-матричной форме:

$$\frac{\partial P(i,t)}{\partial t} = A_0(\lambda)P(i,t) + A_1 P(i+1,t) + A_2(\lambda)P(i-1,t),$$

где

$$A_0(\lambda) = \begin{pmatrix} -(\lambda+\sigma) & 0 & 1/a \\ \sigma & -(\lambda+\sigma+\mu) & 0 \\ 0 & \sigma & -(\lambda+1/a) \end{pmatrix},$$

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \; A_2(\lambda) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Разрешив систему уравнений Колмогорова относительно вероятностей состояния при $t \to \infty$, получим выражения в замкнутой форме для установившихся вероятностей перехода и асимптотические оценки времени передачи данных от источника к узлу сбора информации.

Тип трафика "многие к одному", при котором все узлы сети передают пакеты в одну точку сбора(базовая станция, шлюз и т.п., см. рис.1), характерен для многих задач распределенного сбора информации (например, системы анализа и мониторинга). Поэтому оценка эффективности механизмов маршрутизации в данном режиме имеет важное практическое значение.

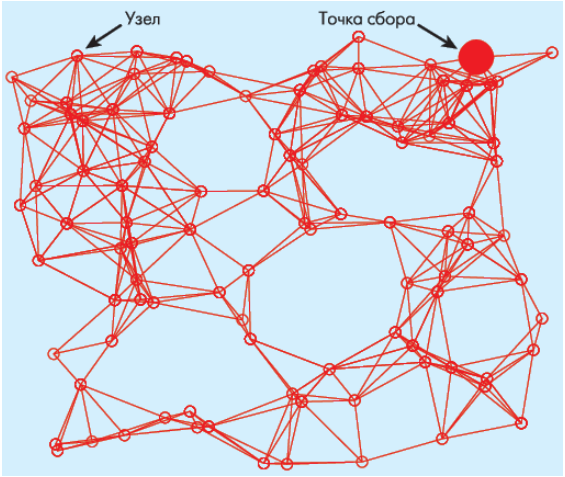


Рис. 1

В качестве модели механизма маршрутизации применяется диффузионный марковский процесс $\xi = \xi(t)$, переходная плотность вероятности которого в $\varepsilon$-окрестности каждой внутренней точки $x$ удовлетворяет обратному уравнению Колмогорова [2]

$$\frac{\partial}{\partial t} = Lp, \quad L = \mathbf{A}(x)\frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{B}(x)\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \quad \mathbf{B}(x) = \frac{1}{2}\mathbf{R}(x),$$

где $\mathbf{A}(x)$ и $\mathbf{B}(x)$ – вектор коэффициентов сноса и матрица коэффициентов диффузии соответственно; $\mathbf{R}(x)$ – корреляционная матрица процесса.

Если $\varepsilon$-окрестность внутренней точки $x$ достаточно мала, можно рассматривать случайный процесс $\xi(t)$ как процесс, управляемый векторным стохастическим дифференциальным уравнением вида

$$d\xi(t) = \mathbf{A}\left[\xi(t)\right]dt + \mathbf{R}\left[\xi(t)\right]d\eta(t),$$

где $\eta(t) = \dfrac{\xi(t) - \xi(t) - \left[\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}(t_0)\right]}{\sqrt{\left|D(t) - D(t_0)\right|}}$, $\left|D(t) - D(t_0)\right| = \int_{t_0}^{t} \left\|\mathbf{B}(\tau)\right\| d\tau$ – процесс броуновского движения; $\left\|\cdot\right\|$ – норма матрицы.

Задача заключается в оптимальном выборе величин $\mathbf{A}(x)$ и $\mathbf{B}(x)$, при котором обеспечивается поддержка трафика типа "многие к одному" для простого поиска маршрутов с минимальной стоимостью и с учетом асимметрии качества связи между узлами.

После первоначальной конфигурации сети (обнаружение соседей и т.п.) все узлы начинают периодическую передачу пакетов данных в точку сбора, по алгоритму маршрутизации с многокритериальной оптимизацией маршрутов. Выбраны следующие критерии оптимизации:

– эффективность использования сети $\eta_T$ – отношение объема полезного трафика к общему объему трафика в сети;

– эффективность использования датчиков $\eta_E$ – общее число принятых точкой сбора пакетов данных до выхода из строя какого-либо узла из-за разряда источника питания.

Эффективность использования сети рассчитывается по формуле $\eta_T = \dfrac{V_d N_{res}}{V_d N_d^{\Sigma} + V_s N_s^{\Sigma}}$, где $V_d$ и $V_s$ – интегральные объемы пользовательской и служебной информации соответственно; $N_{res}$ – общее число нормализованных пакетов данных в точке сбора; $N_d^{\Sigma}$ и $N_s^{\Sigma}$ – общее число нормализованных пакетов данных и сигнальных пакетов, соответственно. Каждый пакет, переданный через транзитный узел, считается отдельно. Так, если пакет передается в точку сбора данных через один транзитный узел (два пролета), считаем, что в сети передано два пакета данных – "полезный" пакет и пакет ретрансляции.

Поэтому чем больше значение $\eta_T$, тем более эффективно протокол маршрутизации использует пропускную способность канала связи. Для простоты полагаем, что все пакеты данных и сигнальные пакеты имеют фиксированные размеры, которые задаются в параметрах модели сети. При идеальном канале связи величины $N_d^{\Sigma}$ и $N_s^{\Sigma}$ включают только "полезные" пакеты данных и пакеты ретрансляции. При реальном канале связи в $N_d^{\Sigma}$ и $N_s^{\Sigma}$ входят пакеты, передаваемые повторно из-за потерь при доставке.

## Выводы

Для асимптотической оценки времени передачи данных от источника к узлу сбора информации использована модель направленной диффузии потока данных, т.е. модель управляемого марковского процесса. При оценки эффективности маршрутизации при использовании типа трафика «многие к одному» в качестве модели механизма маршрутизации применяется диффузионный марковский процесс, переходная плотность вероятности котрого в $\varepsilon$-окрестности каждой внутренней точки $x$ удовлетворяет обратному уравнению Колмогорова.

## Список литературы


1. *Вишневский В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В.* Широкополосные беспроводные сети передачи информации. – М.: Техносфера. – 2005. – 592 с.

2. *Mukherjee A., Bandyopadhyay S., Saha D.* Location management and routing in mobile wireless networks. – Artech House, 2003. – 213 p.

3. *Прохоров Ю.В., Розанов Ю.А.* Теория вероятностей. Основные понятия. Предельные теоремы. Случайные процессы. – М.: Наука, 1967. – 496 с.

4. *Дынкин Е.Б., Юшкевич А.А.* Управляемые марковские процессы и их приложения. – М.: Наука, 1975. – 338 с.

УДК 004.934.1’1(043.2)

*Н.Н. Халаменда*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# РАСПОЗНАВАНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОЙ РЕЧИ В КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

В данной статье рассмотрено распознавание речи в компьютерных системах. Были установлены задачи для успешного распознавания речи. Были рассмотрены недостатки существующих сегодня систем распознавания речи, а также предложены методы для устранения негативного эффекта.

По мере развития компьютерных систем становится все более очевидным, что использование этих систем намного расширится, если станет возможным использование человеческой речи при работе непосредственно с компьютером, и в частности станет возможным управление машиной обычным голосом в реальном времени, а также ввод и вывод информации в виде обычной человеческой речи.

Существующие технологии распознавания речи не имеют пока достаточных возможностей для их широкого использования, но на данном этапе исследований проводится интенсивный поиск возможностей употребления коротких многозначных слов для облегчения понимания. Распознавание речи в настоящее время нашло реальное применение в жизни, пожалуй, только в тех случаях, когда используемый словарь сокращен до 10 знаков, например. Так что насущная задача – распознавание, по крайней мере, 20 тысяч слов естественного языка – остается пока недостижимой. Эти возможности пока недоступны для широкого коммерческого использования. Однако ряд компаний своими силами пытается использовать уже существующие в данной области науки знания.

Для успешного распознавания речи следует решить следующие задачи:

- обработку словаря;
- обработку синтаксиса;
- сокращение речи;
- выбор диктора;
- тренировку дикторов;
- выбор особенного вида микрофона;
- условия работы системы и получения результата с указанием ошибок.

Существующие сегодня системы распознавания речи основываются на сборе всей доступной информации, необходимой для распознавания слов. Исследователи считают, что таким образом задача распознавания образца речи, основанная на качестве сигнала, подверженного изменениям, будет достаточной для распознавания, но тем не менее в настоящее время даже при распознавании небольших сообщений нормальной речи, пока невозможно после получения разнообразных реальных сигналов осуществить прямую трансформацию в лингвистические символы, что является желаемым результатом.

Вместо этого проводится процесс, первым шагом которого является первоначальное трансформирование вводимой информации для сокращения обрабатываемого объема так, чтобы ее можно было бы подвергнуть компьютерному анализу. Примером является "техника сопоставления отрезков", позволяющая сократить вводимую информацию с 50'000 до 800 битов в секунду. Следующим этапом является спектральное представление речи, получившееся путем преобразования Фурье. Результат преобразования Фурье позволяет не только сжать информацию, но и дает возможность сконцентрироваться на важных аспектах речи, которые интенсивно изучались в сфере экспериментальной фонетики. Спектральное представление достигнуто путем использования широко-частотного анализа записи.

Хотя спектральное представление речи очень полезно, необходимо помнить, что изучаемый сигнал весьма разнообразен. Разнообразие возникает по многим причинам, включая:

- различия человеческих голосов;
- уровень речи говорящего;

- вариации в произношении;
- нормальное варьирование движения артикуляторов (языка, губ, челюсти, нёба).

Для устранения негативного эффекта влияния варьирования голосового тракта на процесс распознавания речи было использовано множество методов. Первым делом рассматривалась характеристика пространства траектории артикуляторных органов, включая гласные, используемые говорящим. Техника динамичного искажения используется для временного вытягивания и сокращения расстояния между искаженным спектральным представлением и шаблоном для говорящего. Использование данной техники дало улучшении точного распознавания . Метод динамичного искажения используют практически все коммерчески доступные системы распознавания, показывающие высокую точность сообщения при использовании.

Вначале сигнал преобразовывается в спектральное представление, где определяется немногочисленный, но высокоинформативный набор параметров. Затем определяются конечные выходные параметры для варьирования голоса и производится нормализация для составления шкалы параметров, а также для определения ситуационного уровня речи. Вышеописанные измененные параметры используются затем для создания шаблона. Шаблон включается в словарь, который характеризует произнесение звуков при передаче информации говорящим, использующим эту систему. Далее в процессе распознавания новых речевых образцов, эти образцы сравниваются с шаблонами, уже имеющимися в словаре, используя динамичное искажение и похожие метрические измерения. В настоящее время этот метод изучается и дополняется.

Очевидно, что спектральное представление речи позволяет характеризовать особенности голосового тракта человека и способ использования его говорящим. Самый обычный способ моделирования специфических эффектов "модель-источник" - использование фильтров. Речевой аппарат моделируется с использованием источников, вызывающих резонанс, ведущий к пиковым точкам интенсивности звука в соседстве с отдельными частотами, называемыми формантами. При произнесении звуков вибрация голосовых связок является источником возбуждения, и эти короткие импульсы вызывают резонанс между голосовыми связками и губами. Так как язык, челюсть, губы, зубы и альвеолярный аппарат двигаются, размер и место этих резонансов меняются, давая возможность воспроизведения особых параметров звуков.

Возможно построить очень точную модель, также прямо смоделировать движения артикуляторов физиологически реальным путем. Использование этих моделей привели к пониманию пути, в котором происходит речевой сигнал. Но так как наблюдение над артикуляторами затруднено, остаются недостатки. Возможно все аспекты влияния акустической структуры контролируют сигналы и форму звукового выхода речи.

Аспекты влияния акустической структуры включает в себя:

- природу сегментов индивидуального звука (гласные/согласные);
- структуру слога;
- структуру морфем (приставки, корни, суффиксы);
- лексикон;
- уровень синтаксиса фраз и предложений;
- долгосрочные ограничения речи (long-term discourse constraints).

Ниже рассматривается влияние ограничений и способ их воздействия производство сигнала речи. Необходимо также принять во внимание тот факт, что человеческий аппарат восприятия также должен быть смоделирован, он сам по себе накладывает на процесс восприятия дополнительные ограничения. Недавно процесс восприятия был изучен с помощью метода сигнального подавления барабанных перепонок через возбуждение нервных клеток, которые образовывают примерно 30 тысяч нервных окончаний слухового нерва. Но изучение нервных окончаний способно только прояснить формирование простых синтетических гласных. Перед исследователями встало новое главное направление в области изучения воспроизводства речи, связанное с интеграцией всей физиологии восприятия

человека. В настоящий момент появляются некоторые модели явлений, происходящих в ухе, и не без оснований можно ожидать дальнейшего улучшения понимания процесса распознавания речи из-за более полного понимания характеристик этого влияния.

Что касается уровня артикуляторного контроля, первым уровнем является индивидуальный фонетический сегмент, иначе говоря, - фонема. Во многих естественных языках их примерно 40. Но их набор существенно различается. Поэтому, например, английские гласные могут быть носовыми, даже ненамеренно, в то время как во французском носализация гласных является фонетическим контрастом, и поэтому влияют на значение произносимого.

На следующем уровне лингвистической структуры фонетические сегменты сгруппированы в согласные/гласные, а следовательно и в слоги. Далее, в зависимости от роли фонетического сегмента внутри этих слогов их реализация может быть сильно изменена. Так например, начальный согласный в слоге может быть реализован как абсолютно отличный от конечной позиции. Согласные очень крепко связываются между собой, что опять же влияет на последующие ограничения.

Говорящие на родном языке избегают этих ограничений или могут активно их использовать во время процесса восприятия. Из выше приведенных примеров очевидно, что хотя и существуют сильные ограничения, влияющие на слушателя, но их сила не является решающей во время произнесения речи. То есть любое моделирование процесса восприятия может быть активным и может оказать большую помощь в понимании главного смысла.

Другой пример, показывающий необходимость применения сфокусированного поиска, может быть представлен в восприятии конечного согласного. Среди многих ключевых слов для распознавания конечного согласного существует спектральная природа шума, воспроизводимого при освобождении конечной перемычки и перехода резонанса второй форманты в гласный, следующий за этой перемычкой. Многие исследователи изучали эти влияния, и результаты их исследований показали, что ограничивающее влияние обоих вышеописанных характеристик на восприятие варьируется природой следующего гласного, и следовательно, мощная стратегия распознавания должна иметь некоторые знания о твердой позиции гласного перед конечным согласным перед тем, как будет сделано само распознавание конечного согласного.

Кроме сегментного и слогового уровней существуют ограниченные влияния из-за структуры морфем, которые являются минимальными синтаксическими единицами языка.

Дополнительные ограничения на природе входа новой лексики в язык могут являться уровнем слова. Многие исследования обнаружили, что характеристика слов при введении разбиения на 5 жестких классов фонетических сегментов может быть сокращена до минимума, часто имея единственное в своем роде распознавание. Далее слишком усиливается эффект порядка двух букв и фонетических сегментов с тех пор как в изучении английских и французских словарей было обнаружено, что более 90% слов имели единственное значение и только 0,5% имели 2 и больше альтернатив. На фонемном уровне было обнаружено, что все слова в английском словаре из 20 тысяч слов имели одно значение из-за беспорядочных фонемных пар. Этот пример помогает показать, что все еще существует ограничивающее влияние на лексическом уровне, которое еще не определено в современных системах распознавания речи. Естественно, что исследования в этой области продолжаются.

Кроме уровня слов синтаксис имеет дополнительное ограничительное влияние. Его влияние на последовательный порядок слов часто характеризуется в системах фактором, который в свою очередь характеризует количество возможных слов, которые могут следовать за предыдущим словом в процессе произнесения. Синтаксис также имеет ограничительные влияния на просодические элементы, такие как ударение. Далее, кроме синтаксического уровня ограничения доминируют над семантикой, прагматикой и речью, что плохо осознается людьми, однако имеет очень важное значение для процесса распознавания.

Несмотря на сложность описания характеристик источников различных ограничений, немаловажную роль играют современные системы влияния, которые представлены всеми возможными вариантами произнесения звуков. Например, система HARPI университета Carnegie-Mellon University является системой, в которой звуковоспроизведение описывается как путь через комплексную сеть. В этом способе ограничения структуры слога, слова и синтаксиса связаны одной структурой. Структура контроля, используемая для поиска, является адаптацией динамичной программной техники. Более сильный подход был предложен моделями использования цепей Маркова. Эти модели использовались как единая структура, где возможности могут быть точно изучены экспериментальным путем.

Закодированные представления спектральной трансформации воспроизводства речи используются для нахождения самого правильного пути через сеть, и недавно были получены очень хорошие результаты. Очень важно подчеркнуть использование такого формально- структурного подхода, который способствует автоматичному определению классов символов через структурирование и параметризацию.

При другом подходе базы данных и связанные с ними процессы обработки используются структурой контроля. Этот подход был изучен системой HEARSAJ 2, которая была разработана в институте Carnegie-Mellon University, и системой HWIM (hear what I mean). В этих системах комплексная структура данных, которая содержит всю информацию о воспроизведении звуков, изучается с точки зрения конкретных ограничений. Но как выше указано, каждое из этих ограничений имеет особую внутреннюю модель, и полный анализ не может быть произведен. Для проведения анализа в целом структура данных должна иметь взаимодействие между разными процессами, а также средства для интеграции. Несмотря на то, что структура включает в себя несколько весьма различных источников знаний и ее вклад в понимание речи очень общий, она также имеет большое количество степеней свободы, которые могут быть использованы для тщательного системного воспроизведения.

В отличие от этого, техника, основанная на цепях Маркова, имеет математическую поддержку. Чтобы иметь возможность сфокусированного исследования ограничений взаимодействия и интеграции в контексте, необходимо применять обе системы. Те системы, которые описывают ограничение взаимодействия, сфокусированы во многом на воспроизведении знаний, и они относительно слабо контролируемы, а системам с математической поддержкой, которые в свою очередь имеют великолепную технику для установления параметров и оптимизации изучения, не достает использования комплексной структуры данных, необходимых для характеристики ограничений высокого уровня, таких как синтаксис. Оба направления в настоящий момент находятся в процессе развития.

В заключение следует сделать акцент на влияние производственной технологии на эти системы. Технология интеграции не является большой проблемой для систем распознавания речи, наоборот, это является архитектурой этих систем, включая способ представления ограничений. Необходимо провести грандиозные эксперименты и найти новые способы, которые необходимы для ограничительного влияния взаимодействия.

Во многих способах распознавание речи имеет типичный пример стремительно развивающегося класса высоко интегрированных комплексных систем, которые должны использовать лучшую компьютерную технику и самые последние достижения современного математического обеспечения.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ


1. *А.С. Рылов* Анализ речи в распознающих системах. – Минск: Бестпринт, 2003. – 263 с.
2. *Т.К. Винцюк* Распознавание слов устной речи методами динамического программирования. // Кибернетика. – М., 1968. – С. 81-88.
3. *Методы* автоматического распознавания речи: В 2-х книгах. Пер. с англ./Под ред. У. Ли. – М.: Мир, 1983. – Кн. 1. 328 с

УДК 004.934.1’1(043.2)

*А.Є. Ялковський*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МЕТОДИ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВИ ЛЮДИНИ

*У даній статті приведено аналіз існуючих методів розпізнавання мови людини. Були розглянуті основні типи задач, які не можуть існувати без систем розпізнавання. Теоретично обґрунтовано моделі і методи аналізу та розпізнавання сигналів багатьох змінних. Запропоновано методи, алгоритми і обчислювальні процедури аналізу сигналів на основі параметричних функцій систем, які створюють сигнал.*

На сьогоднішній день суспільство вносить величезну кількість коштів на розвиток *know-how* і науково-дослідні розробки для вирішення проблем автоматичного розпізнавання і розуміння мови. Це стимулюється практичними потребами, пов’язанними із створенням систем воєнного і комерційного призначення. Можна зазначити, що тільки в Європі об’єм продаж систем цивільного призначення складає кілька мільярдів доларів. При цьому слід звернути увагу на те, що в практичному використанні відсутні системи, які вважаються вершиною розвитку автоматичного розпізнавання мови.

Проблема розпізнавання мови на сьогоднішній день вважається надзвичайно серйозною і відіграє надзвичайно велику роль у спілкуванні людини з машиною. Управління об‘єктами за допомогою мови відкрило б широкі перспективи перед автоматизацією у багатьох галузях людської діяльності, відкрило б можливість спілкування з машинами, особливо користувачів персональних комп’ютерів, не знаючих мов програмування. Мовний контакт полегшує запис даних у машину, допомагає працювати людині і комп‘ютеру в реальному масштабі часу: людина сказала – машина виконала.

**Аналіз аналогів**

На даний момент на ринку представлені наступні основні системи, які використовуються для автоматичного розпізнавання мови:

- *Dragon NaturallySpeaking*
- *IBM ViaVoice Gold*
- *L&H Voice Xpress Professional*
- *Philips FreeSpeech* 2000

Вони вважаються найкращими, але ні одна із них не є ідеальною, основні їхні недоліки:

- рівень безпомилковості розпізнавання мови не перевищує 85%;
- нерівномірна якість розпізнавання;
- низька якість розпізнавання власних назв і скорочених слів, повільна робота в середовищі деяких програм;
- затрата великого часу для настройки системи.

Наша мета розробити систему, яка буде максимально наближена до ідеальної, з високим рівнем безпомилковості, простою у використанні, швидкою настройкою.

**Основні проблеми**

Ідея створення системи керування електронним пристроєм, що базується не тільки на тактильній взаємодії людина-машина, але і на голосовому керуванні не нова.

Комп'ютерні системи розпізнавання мови поступово знаходять застосування не тільки в науковій сфері, але й у побутовий. Прикладом тому можуть служити офісні пакети й інше ПО з убудованим розпізнаванням мови дляголосового введення текстової інформації. Що ж стосується портативних пристроїв, то в них лише зараз починають упроваджуватися технології розпізнавання мови.

На сьогоднішній день в умовах глобального розвитку інформатизації, конвергенція технологій голосового керування з мультимедійними функціями портативної і побутової

техніки обумовлює науково-технічний прогрес у створенні нової функціональності передової техніки. Однією з проблем упровадження голосових технологій у портативній техніці був низький обчислювальний ресурс мікропроцесорів, і недостатній обсяг оперативної пам'яті. Крім цього алгоритми з достатньою надійністю розпізнавання мови в умовах складної шумової обстановки навколишнього середовища були занадто ресурсоємні для портативного застосування.

Існуючі сьогодні системи розпізнавання мови ґрунтуються на зборі всієї доступної (часом навіть надлишкової) інформації, необхідної для розпізнавання слів. Дослідники вважають, що в такий спосіб завдання розпізнавання зразка мови, засноване на якості сигналу, підданого змінам, буде достатнім для розпізнавання, але, проте, у цей час навіть при розпізнаванні невеликих повідомлень нормальної мови, поки неможливо після одержання різноманітних реальних сигналів здійснити пряму трансформацію в лінгвістичні символи, що є бажаним результатом.

Для того щоб машина навчилась розуміти людську мову, відповідати на питання потрібно затратити багато сил і часу, забиваючи її гігантською інформацією тільки для того, щоб розпізнати окремі звуки. У кожного звуку складна структура, яка включає в себе різні частоти і коливання, до того ж, те саме слово різні люди вимовляють по-різному: різний тембр голосу, різні інтонації, різна чистота вимови. Скільки людей, стільки й голосів. Голос – індивідуальна ознака особистості.

Щоб навчити машину впізнавати мову, її потрібно заставити прослуховувати слова, сказані як однією людиною, так і різними людьми. Задача машини – прослухавши всі дані, взяти середні значення особливостей вимови, повністю виключити індивідуальність, щоб потім, почувши слово, не зробити помилку.

Найбільші проблеми виникають в умовах: довільний користувач; спонтанна мова, яка супроводжується мовним «сміттям», наявність акустичних завад і скривлень; наявність мовних завад.

Для спрощення процесу розпізнавання мови доцільно було б використовувати шаблони окремих звуків єдині для всіх дикторів. На даний час таких шаблонів не існує через те, що не виявлено інформативних ознак звуків, які не залежать від характерних особливостей голосу.

Тому для реалізації ефективних дикторнезалежних систем автоматизованого розпізнавання мови необхідно виділити інформативні ознаки звуків мови, розробити математичні методи їх опрацювання з метою створення єдиних для всіх дикторів шаблонів.

У такому випадку система розпізнавання не буде потребувати навчання (створення набору шаблонів окремо для кожного диктора), її швидкодія збільшиться, оскільки відпаде необхідність створення набору шаблонів слів і з’явиться можливість розпізнавати мову незалежно від характерних особливостей голосу диктора.

## Три типи задач систем розпізнавання мови

На сьогоднішній день розпізнавання мови зводиться до вирішення трьох типів задач:

1. Розпізнавання окремо вимовлених слів.
2. Розпізнавання злитої мови.
3. Ідентифікація по зразку мови.

Розпізнавання окремих слів по більшій степені використовується для мовного управління обчислювальною машиною.

Метою розпізнавання злитої мови є перетворення в текст звичайної мови людини.

## Механізм розпізнавання для перших двох типів

Для цих двох типів задач механізм розпізнавання мови буде виглядати так, як на рис. 1.

Тут можна виділити 4 основних модуля:

- модуль збору даних;
- екстрактор;
- компаратор;

– інтерпретатор.




Рис. 1. Механізм розпізнавання для перших двох типів

Модуль збору даних включає в себе отримання вхідного сигналу і його попередню обробку, яка може включити автоматичний регулятор посилення, приглушення еха, виявлення присутності або відсутності мови і виявлення інтонаційного кінця фрази.

Цей модуль також включає в себе виділення відрізка мови із вхідного сигналу. Існує декілька алгоритмів визначення початку і кінця мови. В одному із них визначається деякий граничний рівень сигналу. Початкова точка мови в цьому випадку відповідає моменту, коли вхідний сигнал починає перевищувати граничний рівень, а кінцева точка – моменту, де амплітуда вхідного сигналу менша граничної.

Другий метод використовує нормалізацію амплітуди вхідного сигналу у відповідності з мінімальною амплітудою. Отримані нормалізовані значення зрівнюються з граничним значенням.

Екстрактор виконує частотний аналіз сигналу. Акустично-фонетичний потік даних розбивається на короткі кадри, або вектори, тривалістю, як правило, біля 10 мс. Як правило, для кожного кадру визначається ряд параметрів, використовуючи швидке перетворення Фур'є. Крім того можна ще використовувати й інші характеристики, наприклад, спектральні.

Компаратор здійснює акустичні порівняння: кожен кадр, або вектор, порівнюється з акустично-фонетичними зразками, які зберігаються в спеціальній базі даних. При цьому можуть порівнюватись як окремі фонеми, так і слова, і навіть фрази.

При невеликій кількості слів, використовуваних диктором, більш високу надійність і швидкість можна очікувати від розпізнавання цілих слів, але при збільшенні словника швидкість різко падає, і оптимальним стає розпізнавання окремих фонем.

В основному використовується три алгоритми для розпізнавання кадрів:

– алгоритм динамічної трансформації шкали часу;
– приховане Марківське моделювання;
– нейронна мережа з часовою затримкою.

Алгоритм динамічної трансформації шкали часу використовує оптимізаційний принцип для мінімізації кількості помилок, виникаючих при порівнянні розпізнаваного слова з еталонною моделлю.

Приховане Марківське моделювання використовує імовірнісні моделі слів. При використанні цієї технології для кожного можливого варіанта слова, яке розпізнається, вичислюється ймовірність, потім отримані ймовірності порівнюються і вибирається слово з найбільшою ймовірністю.

Нейронна мережа с часовою затримкою у випадку розпізнавання обмеженої кількості слів дає кращі результати ніж метод прихованого Марківського моделювання.

Один із методів, оснований на порівнянні фонем, використовує поняття «контекстна фонема». В даному методі фонема розглядається в поєднанні з попередньою і наступною фонемою. Далі в процесі розпізнавання визначається фонема, яка найбільше близько відповідає тій, яка розпізнається.

Інтерпретатор вирішує задачу динамічного програмування з метою знайти найкраще розбиття отриманого від компаратора алфавітного потоку на слова і фрази. В залежності від об'єму використовуваного словника і діючих синтаксичних правил, застосовуються різні стратегії пошуку і відсіювання.

В даному блоці із розпізнаних фонем формуються слова, а із слів фрази. При цьому також часто використовується ймовірна система порівняння результатів.

Ідентифікація по зразку мови використовується для досягнення забезпечення безпеки. Вона складається із трьох стадій:

– регістрація;
– тестування;
– допуск.

**Механізм розпізнавання для третього типу**

Схема ідентифікації по зразку мови представлена на рис. 2.




Рис. 2. Механізм розпізнавання для третього типу

В процесі регістрації користувача запам’ятовуються особливості його голосу і формується так звана мовна модель. При тестуванні виконується порівняння запропонованого зразка мови із запам’ятованою мовною моделлю користувача, а також з моделлю «самозванця», складеною на базі голосів інших людей. Якщо результат порівняння виявиться позитивним для першого випадку і негативним для другого, можна вважати , що тестування пройшло успішно. Ідентифікацію по голосу можна використовувати і в поєднанні з іншими засобами забезпечення безпеки.

Системи розпізнавання мови можуть також поділятися на:

– диктороорієнтовані;
– дикторонезалежні.

Системи першого типу потребують наявності етапу «навчання», тобто налаштування системи на конкретного користувача, якому необхідно промовити визначений набір слів для того, щоб еталонні моделі його вимови були занесені у базу даних. Згодом при розпізнаванні мови цього користувача система опирається на еталонні моделі, які зберігаються у базі даних.

У випадку використання системи іншим користувачем необхідне повторне навчання.

**Висновки**

У даній статті приведено аналіз існуючих методів розпізнавання мови людини. Були розглянуті основні типи задач, які не можуть існувати без систем розпізнавання. Теоретично обґрунтовано моделі і методи аналізу та розпізнавання сигналів багатьох змінних. Запропоновано методи, алгоритми і обчислювальні процедури аналізу сигналів на основі параметричних функцій систем, які створюють сигнал.

На сьогоднішній день існує дуже багато методів вирішення цих проблем, але ні один метод не є ідеальним, їхня точність не перевищує 85%. Наша мета добитися результатів, які максимально будуть наближені до ідеальних.

**Список літератури**

1. *Оппенгейн А.В., Шафер Р.В.* Цифровая обработка сигналов – М.: Радио и связь, 1979. – 347 с.
2. *Кузнецов В., Отт А.* Автоматический синтез речи. – Таллинн: Валгус, 1989. – 135 с.

УДК 629.7.05

*Н.А. Михалочкин, д.т.н., Касем Аббуд Махди, аспирант*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

*Разработана математическая модель в ошибках инерциальной навигационной системы в интересах исследования потенциальных точностных возможностей навигационных комплексов на основе методов теории оптимальной линейной фильтрации*

Использование методов теории оптимальной линейной фильтрации (ОЛФ) в интересах исследования возможностей навигационных комплексов в составе различных интегрированных систем, в том числе, систем предупреждения столкновений (СПС) самолётов в воздухе, предполагает математическое описание комплексируемых навигационных измерителей в виде систем обыкновенных линейных дифференциальных уравнений первого порядка. Математическое описание навигационных средств заключается в описании их сигналов в зависимости от их физической природы, физических законов их принципа действия и результатов анализа их динамических и статистических свойств.

Обычно они устанавливают нелинейную дифференциальную или функциональную связь между навигационными параметрами и физическими характеристиками навигационной системы, среды и используемых физических полей.

Разложение в ряд Тейлора уравнений связи позволяет получить аппроксимацию этой связи с любой степенью точности, в том числе и требуемую нам линейную аппроксимацию. Линейная часть аппроксимирующего многочлена показывает динамику изменения навигационного параметра в зависимости от состава слагаемых в многочлене и от характера их изменения. Ограничившись ею, получаем уравнение результирующей погрешности навигационной системы, линейное относительно погрешностей источников их порождающих. В дальнейшем производится анализ источников погрешностей конкретного навигационного измерителя. На основании накопленного опыта эксплуатации навигационного средства можно установить наиболее важные слагаемые в линейной части аппроксимирующего многочлена или дополнить его, добиваясь, таким образом, сходства в основном модели с реальным навигационным измерителем. При отсутствии достаточной информации о характере погрешностей исследуемого навигационного средства за основу построения модели может быть взята вся линейная часть аппроксимирующего многочлена без уточнений и дополнений.

Измерения навигационного параметра сопровождаются возмущающими воздействиями и слагаемые, входящие в многочлен, имеют случайную природу. Поэтому для создания моделей навигационных систем, стохастических по своим свойствам, необходимо установить их вероятностные законы распределения и корреляционные свойства на основе статистических данных о погрешностях конкретной системы.

Знание динамических и статистических свойств погрешностей навигационного средства позволяет получить его математическую модель в требуемом виде.

Распространенное и более полное описание инерциальной навигационной системы (ИНС) основывается на следующем подходе. На основании кинематических уравнений инерциальной навигации может быть однозначно определена траектория ВК относительно выбранной системы координат (СК). Знание уравнений инерциальной навигации необходимо для формирования уравнений погрешностей ИНС относительно номинальной траектории воздушного корабля (ВК). Система кинематических уравнений ИНС может быть получена из двух векторных уравнений.

Рассмотрим одно из них - уравнение для абсолютного движения точки, соответствующей началу базовой, совпадающей с центром масс ВК и участвующей в относительном и переносном движении [1,3]:

$$\overline{A} + \overline{g}_0(\overline{R}) = (\frac{dV}{dt})_3 + (\overline{\varpi} + \overline{\Omega}) \times \overline{V} + \overline{\Omega} \times (\overline{\Omega} \times \overline{R}), \qquad (1)$$

где $\overline{A} + \overline{g}_0(\overline{R})$ - вектор абсолютного ускорения;

$\overline{A}$ - вектор ускорения негравитационных сил, сигнал акселерометра;

$\overline{g}_0(\overline{R})$ - ускорение гравитационного поля Земли в точке ( $\overline{R}$ );

$\overline{R}$ - вектор, определяющий положение объекта;

$(\frac{\overline{dV}}{dt})_3$ - вектор ускорения относительно поверхности Земли;

$\overline{\varpi}$ - вектор угловой скорости базовой СК относительно псевдоинерциальной (земной);

$\overline{\Omega}$ - вектор угловой скорости Земли (переносное движение);

$\overline{V}$ - вектор скорости ВК относительно Земли (относительное движение).

Псевдо(квази)инерциальной СК называют геоцентрическую , поскольку в следствие неравномерного вращения Земли вокруг Солнца возникают ускорения. Псевдо (квази) потому, что не абсолютно инерциальная.

Располагая уравнением (1) легко получить уравнение в вариациях, воспользовавшись разложением его в ряд Тейлора, или взяв дифференциал от обеих частей равенства.

Тогда уравнение в погрешностях можно записать в виде:

$$\overline{\dot{\delta V}} = \overline{\delta A} - (\overline{\varpi} + \overline{\Omega}) \times \overline{\delta V} - \overline{\delta \varpi} \times \overline{V} - \overline{\Omega} \times (\overline{\Omega} \times \overline{\delta R}) + \overline{\delta g}_0(\overline{R}), \qquad (2)$$

где $\overline{\delta A}$ - погрешности на выходе акселерометра из-за смещения нуля, неопределенности масштаб - ных коэффициентов, вибрационные воздействия и т.п.;

$\overline{\delta V}$ - погрешности на выходе первого интегратора ИНС;

$\overline{\delta \varpi}$ - погрешности стабилизации платформы относительно местной горизонтальной плоскости;

$\overline{\delta R}$ - погрешности положения объекта на выходе второго интегратора ИНС;

$\overline{\delta g}_0$ - погрешности, обусловленные неточным знанием величины ускорения гравитационного поля Земли.

Наряду с перечисленными источниками погрешностей (2) существенные погрешности инерциальных измерителей обусловлены неточностью ориентирования платформы, на которой они установлены. Погрешности ориентирования платформы могут быть получены из другого уравнения - уравнения стабилизации акселерометрического трехгранника по осям базовой системы координат, реализованной с помощью управляемых гироскопических приборов, позволяющих фиксировать положение системы отсчета по-местному горизонту с точностью до первоначальной выставки, погрешностей управления платформой и собственного дрейфа [1,3]:

$$\overline{\psi} + \overline{\varpi} \times \overline{\psi} = \overline{E}, \qquad (3)$$

где $\overline{\psi} = \overline{\Phi} - \overline{\delta\Theta}$ - вектор угла между осью платформы и осями вычислительного устройства;

$\overline{\Phi}$ - вектор угла между точной осью, соответствующей действительному положению объекта, и осью платформы;

$\overline{\delta\Theta}$ - вектор угла между точной осью и осью, определяемой вычислительным устройством;

$\overline{\varpi}$ - вектор угловой скорости системы координат с точным направлением координатных осей относительно псевдоинерциального (земного) пространства;

$\overline{E}$ - вектор угловой скорости ухода гироскопов, или дрейф гироскопов.

Уравнение (3) характеризует накопление с течением времени погрешностей углов между осями инерциальных измерителей, ортогонально расположенных на гиростабилизированной платформе и вычислительного устройства из-за дрейфов гироскопов.

Координатный трехгранник базовой системы отсчета в процессе движения ВК поворачивается в инерциальном пространстве с угловой скоростью $\overline{\varpi}$, обусловленной вращением Земли и относительным движением ВК, благодаря корректирующим моментным датчикам, или специальным следующим системам за местным горизонтом. Составляющие вектора $\overline{\varpi}$ являются функциями широты, угловой скорости вращения Земли и производных от географических координат. Поэтому процесс стабилизации платформы по местному горизонту происходит с существенными погрешностями $\overline{\delta\dot{\Theta} = \delta\varpi}$, связанными с погрешностями вычисления перечисленных параметров. Векторное произведение $(\overline{\Phi} \times \overline{\mathrm{A}})$ позволяет учесть погрешности в определении ускорения из-за погрешностей ориентирования платформы $\overline{\Phi}$, которым должно быть дополнено уравнение (1).

Полученные выше уравнения погрешностей ИНС (2), (3) представляют собой систему дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, которые как и свободные члены этих уравнений: $\overline{\delta\mathrm{A}}$, $\overline{\mathrm{E}}$ - являются случайными функциями времени. Для исследования этих уравнений необходимо знать статистические характеристики входящих в уравнения случайных функций. Обычно эти характеристики определяются в процессе испытаний систем.

На основании экспериментальных данных допускается, что погрешности $\overline{\delta}\,\mathrm{A}$ и $\overline{\mathrm{E}}$ представляют собой стационарные случайные функции с нулевым математическим ожиданием и с экспоненциальной корреляционной функцией. Погрешности измерителей принято описывать в корреляционном или спектральном представлении. Однако известны способы построения соответствующих дифференциальных уравнений для случайных процессов, с дробно-рациональными спектрами, то есть представление их во временной области переменных[4].

Такие случайные функции могут быть описаны с помощью дифференциального уравнения вида:

$$\dot{\delta\mathrm{x}} = -\alpha\delta\mathrm{x} + \sqrt{2\alpha}\,\mathrm{Д}_{\mathrm{x}}\,\omega, \qquad (4)$$

где x – коррелированный процесс;

$\omega$ - гауссовский шум единичной дисперсии;

$\alpha = \dfrac{1}{\mathrm{T}}$ - величина, обратная постоянной корреляции;

$\mathrm{Д}_{\mathrm{x}}$ – дисперсия процесса.

Координаты местоположения ВК связаны дифференциальной зависимостью с составляющими скорости и определяются выражениями:

$$\dot{\mathrm{B}} = \frac{\mathrm{V_N}}{\mathrm{M+H}}, \qquad (5)$$

$$\dot{\mathrm{L}} = \frac{\mathrm{V_E}}{(\mathrm{N+H})\mathrm{Cos\,B}}\quad .$$

Откуда погрешности равны дифференциалам:

$$\dot{\delta\mathrm{B}} = -\frac{3}{2}\frac{\mathrm{Me^2 Sin\,2B\cdot V_N}}{(1-\mathrm{e^2Sin^2B})(\mathrm{M+H})^2}\delta\mathrm{B} + \frac{1}{\mathrm{M+H}}\delta\mathrm{V_N}, \qquad (6)$$

$$\dot{\delta L} = [\frac{V_E \, Sin\, B}{(N+H)Cos^2 B} - \frac{Ne^2 Sin\, 2B \cdot V_E}{2(N+H)^2(1-e^2 Sin^2 B)Cos\, B}]\delta B + \frac{\delta V_E}{(N+H)Cos\, B},$$

где $\delta B, \delta L$ - погрешности вычисления соответственно широты и долготы ВК.

Благодаря выражениям (4) и (6) достигается замкнутость системы дифференциальных уравнений (2) и (3) и выполняется условие применения фильтра Калмана, так как уравнения погрешностей ИНС представлены в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка.

Далее произведем преобразование векторных уравнений (1) и (2) с учетом (5), (6) и наиболее существенных составляющих погрешностей ИНС по осями базовой системы координат, исключая из рассмотрения вертикальный канал инерциального измерителя. Вертикальный канал ИНС обычно рассматривается отдельно поскольку предполагается его демпфирование с помощью других средств, например, высотомеров. Скорость вращения $\lambda$ Земли относительно координатных осей определяется выражениями:

$$\lambda_N = \lambda Cos\, B, \quad \lambda_E = 0, \quad \lambda_H = -\lambda Sin\, B \ . \qquad (7)$$

Инерциальная угловая скорость относительно этих осей равна:

$$\omega_N = \frac{V_E}{N+H} + \lambda Cos\, B,$$

$$\omega_E = -\frac{V_N}{M+H}, \qquad (8)$$

$$\omega_H = -(\frac{V_E tg\, B}{N+H} + \lambda Sin\, B.$$

Погрешности вычисления инерциальной угловой скорости платформы представим дифференциалами выражений (8):

$$\delta\omega_N = -(\lambda Sin\, B + \frac{Ne^2 Sin\, 2B \cdot V_E}{2(N+H)^2(1-e^2 Sin\, B)})\delta B + \frac{\delta V_E}{N+H}, \qquad (9)$$

$$\delta\omega_E = \frac{3Me^2 Sin\, 2B \cdot V_N}{2(M+H)^2(1-e^2 Sin^2\, B)}\delta B - \frac{\delta V_N}{M+H},$$

$$\delta\omega_H = \{-[\frac{V_E}{(N+H)Cos^2 B} + \lambda Cos\, B] + \frac{Ne^2 Sin\, 2B \cdot V_E \cdot tg\, B}{2(N+H)^2(1-e^2 Sin^2 B)}\}\delta B - \frac{tgB}{N+H}\delta V_E.$$

Для компактности записей введем в рассмотрение вектор $\delta X_1$ погрешностей ИНС, составляющие которого соответственно равны:

$$\delta X_1^T = \{\delta B, \delta L, \delta V_N, \delta V_E, \Phi_N, \Phi_E, \Phi_H, \delta A_N, \delta A_E, \delta A_N, E_N, E_E, E_H\}. \qquad (10)$$

Здесь и везде в дальнейшем Т- символ операции транспортирования.

Тогда модель погрешностей ИНС может быть представлена в матричной записи:

$$\dot{\delta X}_1(t) = F_И(t)\,\delta X_1(t) + G_И\omega, \qquad (11)$$

где $\omega$ - вектор гауссовских шумов единичной дисперсии.

Элементы матрицы $F_И(t)$ размерности (12×12) равны:

$$F_{и11} = -\frac{3M\,e^2 Sin\,2B \cdot V_N}{2(M+H)^2(1-e^2Sin^2B}; \quad F_{и13} = \frac{1}{M+H};$$

$$F_{и21} = \frac{V_E Sin\,B}{(N+H)Cos^2B} - \frac{Ne^2 Sin\,2B \cdot V_E}{2(N+H)^2(1-e^2Sin^2B)Cos\,B}; \qquad F_{и24} = \frac{1}{(N+H)Cos\,B};$$

$$F_{и31} = -[\frac{V_E{}^2}{(N+H)Cos^2B} + 2\lambda V_E Cos\,B] + \frac{Ne^2 Sin\,2B\,V_E{}^2 tg\,B}{2(N+H)^2(1-e^2Sin^2B)}; \quad F_{и34} = -2(\frac{V_E tg\,B}{N+H} + \lambda Sin\,B);$$

$$F_{и36} = -A_H; \quad F_{и37} = A_E; \quad F_{и38} = 1;$$

$$F_{и41} = \frac{V_E \cdot V_N}{(N+H)Cos^2B} + 2\lambda V_N Cos\,B - \frac{Ne^2 Sin\,2B\,V_E V_N tg\,B}{2\cdot(N+H)^2(1-e^2Sin^2B)}; \quad F_{и43} = \frac{V_E tg\,B}{N+H} + 2\lambda Sin\,B;$$

$$F_{и44} = \frac{V_N tg\,B}{N+H}; \quad F_{и45} = A_N; \quad F_{и47} = -A_N; \quad F_{и49} = 1;$$

$$F_{и51} = -[\lambda Sin\,B + \frac{Ne^2 Sin\,2B \cdot V_E}{2(N+H)^2(1-e^2Sin^2B)}]; \quad F_{и54} = \frac{1}{N+H}; \quad F_{и56} = \omega_H; \qquad F_{и57} = -\omega_E;$$

$$F_{и5,10} = 1; \quad F_{и61} = \frac{3Me^2 Sin\,2B \cdot V_N}{2(M+H)^2(1-e^2Sin^2B)}; \quad F_{и63} = -\frac{1}{M+H}; \quad F_{и65} = -\omega_H; \quad F_{и67} = \omega_N;$$

$$F_{и611} = 1; \quad F_{и71} = -[\frac{V_E}{(N+H)Cos^2B} + \lambda Cos\,B] + \frac{Ne^2 Sin\,2B \cdot V_E tg\,B}{2(N+H)^2(1-e^2Sin^2B)}; \quad F_{и74} = -\frac{tg\,B}{N+H};$$

$$F_{и75} = \omega_E; \quad F_{и76} = -\omega_N; \quad F_{и712} = 1; \quad F_{и88} = -\frac{1}{T_1}; \quad F_{и99} = -\frac{1}{T_2};$$

$$F_{и1010} = -\frac{1}{T_3}; \quad F_{и1111} = -\frac{1}{T_4}; \quad F_{и1212} = -\frac{1}{T_5};$$

остальные элементы матрицы $F_и(t)$ равны нулю.

$G_и$ – матрица распределения входа размерности (12×6) с элементами:

$$G_{и8,1} = G_{и9,2} = \sqrt{\frac{2Дi}{Ti}},\ i = 1,2,$$

$$G_{и\ 03} = G_{и11,4} = \sqrt{\frac{2Дi}{Ti}},\quad i = 3,4,$$

$$G_{и12,5} = \sqrt{\frac{2Д_5}{T_5}};$$

остальные элементы матрицы $G_и$ равны нулю.

Система двенадцати линейных нестационарных дифференциальных уравнений представляет собой математическую модель ИНС, описывающую поведение (динамику) погрешностей ИНС во времени.

В действительности уравнения движения (11) являются стохастическими и отражают вероятностные связи между погрешностями ИНС.

Нестационарность линеаризованной модели ИНС накладывает определенные требования на величину шага интегрирования уравнений (11). Для воспроизведения характера движения инерциальной системы шаг дискретности должен быть выбран в соответствии с теоремой квантования В. А. Котельникова.

Известно [2], что для воспроизведения непрерывного процесса допустимая дискретность Δ должна быть

$$\Delta = \frac{\pi}{10\omega_{max}} = \frac{T_м}{20[2 \div 4]} \quad > = \frac{\pi}{10 \cdot 2\pi F_{max}},$$

где $\omega_{max}$ - максимальная частота спектра;

$T_m$ - период Шулера (84,4мин ).

В связи с тем, что частотный спектр ИНС узкополосный и максимальная частота спектра соответствует двух - четырехкратной частоте Шулера, при переходе от непрерывной модели ИНС (11) к ее дискретному аналогу может быть использован шаг дискретности достаточно большим, равным единицам минут.

## Список литературы


1. Инерциальные системы управления/Под. ред. *Д. Питтмана*.- М.: Воениздат, 1968. - 770с.
2. Многопозиционные радиотехнические системы/Под. ред. *В.В. Цветкова*.- М.: Радио и связь, 1986.- 264с.3.
3. *Михалочкин Н. А.* Исследование алгоритмов обработки информации в инерциально-допплеровском комплексе, корректируемом по сигналам сверхдлинноволновой радионавигационной системы// Исследование эффективности алгоритмов обработки информации в навигационных системах: Науч. техн. сб. Юб. Вып 3(290).-В/ч 48230, 1975.- С.26-32.
4. *Михалочкин Н. А.* Методика определения параметров фильтра, формирующего случайный процесс // Материалы научно - методической конференции молодых учёных.- Щёлково: В/ч 48230, 1980.- С.56-57.

УДК: 629.7.07

*Т.Ф. Шмельова, кандидат технічних наук,*
*Ю.В. Сікірда, кандидат технічних наук, І.Л. Якуніна*
*(Державна льотна академія України, Україна)*

# ДЕКОМПОЗИЦІЯ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ПРОЦЕСІВ ДІЯЛЬНОСТІ ЛЮДИНИ-ОПЕРАТОРА В НЕОЧІКУВАНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОВІТРЯНОГО СУДНА

*Проведена декомпозиція системи управління повітряним рухом, розглянуто системний підхід до побудови моделі прийняття рішення людиною-оператором авіаційної ергатичної системи в неочікуваних умовах експлуатації повітряного судна з комплексним урахуванням факторів на кожному етапі процесу прийняття рішення.*

Згідно статистичним даним [1], причинність авіаційних подій останнє десятиріччя практично не змінюється: 70-80% аварій і катастроф відбувається через людський фактор і тільки 15-20% – через конструктивно-виробничі недоліки авіаційної техніки. Тому своєчасне діагностування та прогнозування можливих дій людини-оператора (Л-О) авіаційної ергатичної системи (АЕС) залишається актуальною проблемою для забезпечення безпеки польотів.

Система управління повітряним рухом (УПР) відноситься до складних поліергатичних систем, наявність колективу людей в контурі управління якої значно ускладнює прогнозування процесів змінення стану об'єктів в системі (літальних апаратів, їх сукупності чи авіатранспортних потоків). Особливістю системи є те, що авіадиспетчер приймає рішення в умовах невизначеності навколишнього середовища, при неповністю заданих цілях, суперечливих показниках ефективності для визначення багатокритеріальної мети управління [2].

Система УПР, в залежності від етапу її функціонування, як і будь-яка інша система, має *об'єкт управління* (ОУ) – повітряні судна (ПС), потоки ПС, організаційну структуру УПР тощо та *управляючі елементи* (УЕ) – люди, що приймають рішення (ЛПР) (диспетчер польотно-інформаційного обслуговування (ПІО), аеродромно-диспетчерської вишки (АДВ), диспетчерського обслуговування підходу (ДОП), районного диспетчерського центру (РДЦ), керівники польотів) [2, 3, 4].

Метою управління є вироблення авіадиспетчером (УЕ) таких оптимальних дій $Y_у$, щоб забезпечити ПС (ОУ) задану програму польоту $Y_з$ при різних впливах збурюючих дій $Y_{зб}$, тобто змінах динамічної повітряної обстановки (ДПО), за допомогою каналу зворотного зв'язку $Y_{зв}$ і звести неузгодженість $\Delta Y=Y_д-Y_з$ до мінімуму. Вироблення ефективних рішень можливе в тому випадку, якщо відомі параметри відхилень дійсних значень елементів, якими управляють (ПС) від заданих (заданої чи бажаної програми польоту ПС) (рис. 1).

Система УПР має складну гнучку та розгалужену структуру, для оптимального функціонування якої необхідна раціональна декомпозиція (табл. 1) та агрегування з урахуванням виконання ПС відповідного етапу польоту (зліт, набір висоти, горизонтальний політ, зниження, посадка), взаємодії елементів і підсистем системи УПР, розвитку ситуації (нормальна, ускладнена, складна, аварійна, катастрофічна) [2, 5].

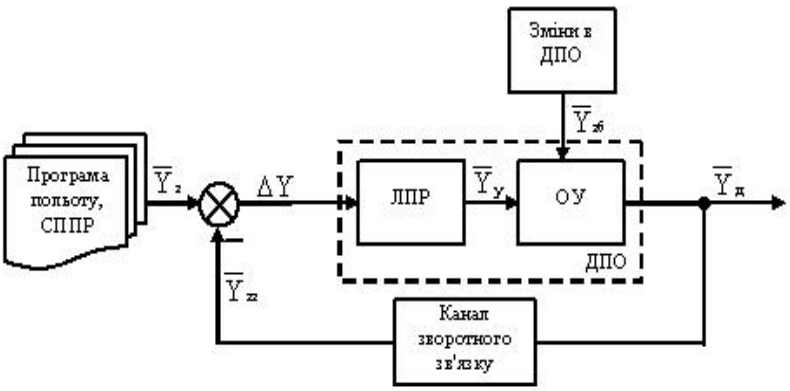



Рис. 1. Функціональна схема системи управління повітряним рухом

*Таблиця 1*

Декомпозиція процесу управління повітряним рухом в стандартних умовах

| | | | |
|---|---|---|---|
| G0 (ПІО) | G0,1 | Підписання завдання на виліт | Зліт ПС |
| | G0,2 | Передача G1 інформації про виліт ПС | |
| G1 (АДВ) | G1,1 | Підтвердження G0 про прийом інформації про виліт ПС | |
| | G1,2 | Встановлення зв'язку з екіпажем ПС (ЕПС) | |
| | G1,3 | Видача дозволу ЕПС на запуск | |
| | G1,4 | Видача дозволу ЕПС на руління | |
| | G1,5 | Видача вказівок ЕПС при рулінні ПС на попередній старт | |
| | G1,6 | Видача ЕПС метеоінформації і дозволу на зліт | |
| | G1,7 | Передача інформації про факт вильоту G0 | |
| | G1,8 | Прийом підтвердження про прийняття інформації про факт вильоту ПС від G0 | |
| | G1,9 | Передача G2 інформації про факт вильоту ПС і відповідальності за управління рухом ПС | |
| G2 (ДОП) | G2,1 | Прийом від G1 інформації про ПС і відповідальності за управління рухом ПС | |
| | G2,2 | Встановлення зв'язку з ЕПС | |
| | G2,3 | Контроль за зльотом ПС | |
| | G2,4 | Передача G3 інформації про ПС і відповідальності за управління рухом ПС | Набір висоти ПС |
| G3 (РДЦ вильоту) | G3,1 | Прийом від G2 інформації про факт вильоту ПС і відповідальності за управління рухом ПС | |
| | G3,2 | Встановлення зв'язку з ЕПС | |
| | G3,3 | Контроль польоту ПС при виході ЕПС на зв'язок | |
| | G3,4 | Контроль зайняття ПС заданого ешелону польоту | |
| | G3,5 | Контроль ПОД1 | Горизонтальний політ ПС |
| | ... | … | |
| | G3,(n-1)+3 | Контроль ПОД(n-1) | |
| | G4,n+3 | Передача інформації про ПС і відповідальності за УПР ПС суміжному РДЦ | |
| | G4,n+4 | Вихід ПС з зони відповідальності G3 | |
| … | ... | | |
| Gm-3 (РДЦ прольоту) | Gm-3,1 | Прийом інформації про ПС і відповідальності за УПР ПС від суміжного РДЦ | |
| | Gm-3,2 | Вхід ПС в зону відповідальності Gm-3 | |
| | Gm-3,3 | Встановлення зв'язку з ЕПС | |
| | Gm-3,4 | Контроль ПОД1 | |
| | ... | … | |
| | Gm-3,(n-1)+2 | Контроль ПОД(n-1) | |
| | Gm-3,n+2 | Передача інформації про ПС і відповідальності за УПР ПС суміжному РДЦ | |
| | Gm-3,n+3 | Вихід ПС з зони відповідальності Gm-3 | |
| Gm-2 (РДЦ посадки) | Gm-2,1 | Прийом інформації про ПС і відповідальності за УПР ПС від суміжного РДЦ | |
| | Gm-2,2 | Вхід ПС в зону відповідальності Gm-3 | |
| | Gm-2,3 | Встановлення зв'язку з ЕПС | |
| | Gm-2,4 | Контроль ПОД | |
| | Gm-2,5 | Контроль ПОД перед рубежем початку зниження, видача інформації для посадки | |
| | Gm-2,6 | Передача Gm-1 інформації про приліт ПС | Зниження ПС |
| | Gm-2,7 | Контроль зниження ПС на заданий ешелон | |
| | Gm-2,8 | Контроль за зайняттям ПС заданого ешелону | |
| | Gm-2,9 | Передача відповідальності за УПР ПС Gm-1 | |
| Gm-1 (ДОП) | Gm-1,1 | Прийом від Gm-2 інформації про ПС і відповідальності за УПР ПС | |
| | Gm-1,2 | Встановлення зв'язку з ЕПС | |
| | Gm-1,3 | Видача інформації ЕПС про полосу посадки, зниження по ешелонам | |
| | Gm-1,4 | Контроль за рухом ПС. При відхиленні від курсу давати поправки. | |
| | Gm-1,5 | Отримання від Gm інформації про полосу (вільна/зайнята) | |
| | Gm-1,6 | Видача ЕПС дозволу на посадку | |
| | Gm-1,7 | Передача Gm інформації про ПС і відповідальності за управління рухом ПС | Посадка ПС |
| Gm (АДВ) | Gm,1 | Прийом від Gm-1 інформації про ПС і відповідальності за УПР ПС | |
| | Gm,2 | Встановлення зв'язку з ЕПС | |
| | Gm,3 | Прийом від ЕПС докладу про готовність до посадки | |
| | Gm,4 | Контроль за посадкою ПС | |
| | Gm,5 | Вказівки ЕПС при звільненні полоси | |
| | Gm,6 | Видача ЕПС інформації про стоянку | |
| | Gm,7 | Контроль за рулінням ПС на задану стоянку | |
| | Gm,8 | Отримання від ЕПС підтвердження про знаходження на заданій стоянці | |
| КІНЕЦЬ | | | |

Для моделювання раціональної управляючої дії диспетчера при прогнозуванні розвитку польотної ситуації в неочікуваних умовах експлуатації ПС представимо систематизацію змін в ДПО з точки зору можливого розвитку польотних ситуацій на одному з етапів польоту та характеристик ЛПР.

На кожному з етапів виконання польоту можливе виникнення однієї з польотних ситуацій, представлених на рис. 2.

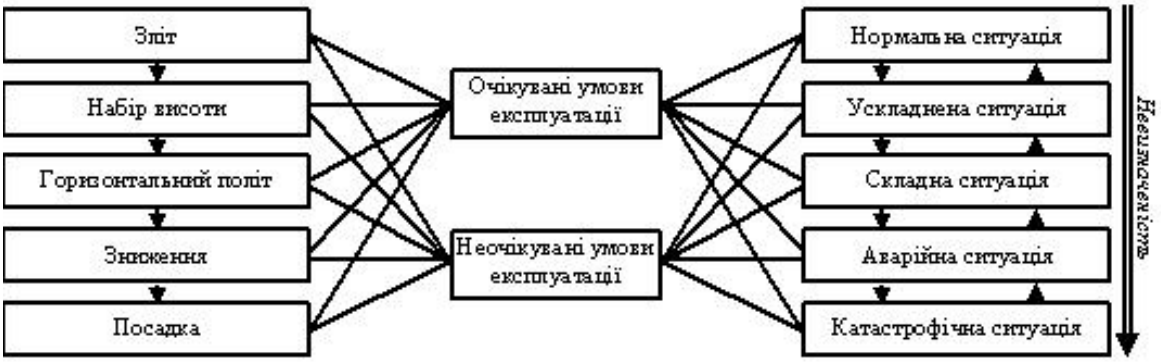



Рис. 2. Розвиток позаштатних польотних ситуацій в умовах ДПО

В нормальній ситуації оператором виконуються стандартні процедури пілотування та управління повітряним рухом, які чітко регламентовані нормативними документами. Позаштатні ситуації вимагають оперативного втручання Л-О в розвиток подій для попередження переходу ситуації в ранг катастрофічної.

При цьому керівництво з льотної експлуатації розраховано тільки на очікувані умови експлуатації ПС і не включає в себе дії екіпажа в екстремальних умовах, зустрічі з якими можна надійно уникнути шляхом введення експлуатаційних обмежень і правил, або які виникають настільки рідко, що вимога виконувати норми льотної придатності в них привела б до забезпечення більш високого рівня льотної придатності, чим це необхідно і практично обґрунтовано [6]. Через це в близько 20% випадків екіпаж не має чітких інструкцій з парирування позаштатних ситуацій на борту ПС [7].

Модель прийняття рішень Л-О АЕС в неочікуваних умовах експлуатації ПС можна представити у вигляді ієрархічної структури (рис. 3).

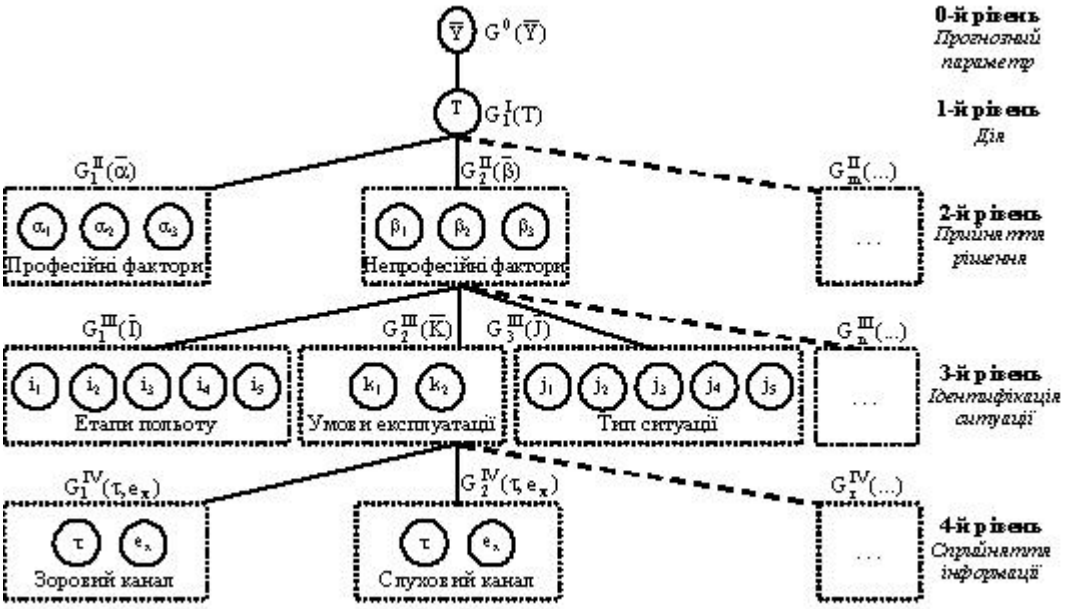



Рис. 3. Модель прийняття рішень Л-О АЕС

Л-О АЕС сприймає основну інформацію через зоровий і слуховий канали. Час на сприйняття інформації залежить від індивідуального показника затримки сенсорної реакції оператора $\tau$ і ергономічних характеристик обладнання $e_x$ тощо [8].

Ідентифікація ситуації залежить від етапу польоту $\bar{I} = \{i_1, i_2, i_3, i_4, i_5\}$, умов експлуатації ПС $\bar{K} = \{k_1, k_2\}$, а також типу польотної ситуації $\bar{J} = \{j_1, j_2, j_3, j_4, j_5\}$.

На прийняття рішення Л-О впливають фактори професійного (рівень знань, навичок і вмінь) $\bar{\alpha} = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$ [1] та непрофесійного (психофізіологічні, індивідуально-психологічні, суспільно-психологічні фактори) $\bar{\beta} = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3\}$ характеру [9].

Швидкість моторної реакції на ситуацію, що виникла, залежить від індивідуального показника нервово-м'язового запізнення оператора T [8].

У підсумку параметр Y, на основі якого прогнозуються дії Л-О в неочікуваних умовах експлуатації ПС, є функцією всіх факторів, перелічених вище: $\bar{Y} = \{\tau, e_x, \bar{I}, \bar{K}, \bar{J}, \bar{\alpha}, \bar{\beta}, T\}$.

## Висновки

Розроблена модель прийняття рішення Л-О АЕС в неочікуваних умовах експлуатації ПС з комплексним урахуванням факторів на кожному етапі процесу прийняття рішення дозволить своєчасно діагностувати потрапляння ПС в позаштатні польотні ситуації, прогнозувати їх розвиток і оперативно надавати відповідну допомогу оператору авіаційної ергатичної системи.

## Список літератури


1. *Макаров Р.Н., Зарецкий В.М., Федоришин В.И.* Человеческий фактор: рождение авиации, летное обучение, тренажеры. – М.: МАПЧАК, 2003. – 524 с.

2. Организация управления воздушным движением / *В.А. Алешин, Ю.П. Дарымов, Г.А. Крыжановский* и др.; Под ред. Г.А. Крыжановского. – М.: Транспорт, 1988. – 264 с.

3. Правила полетов и обслуживания воздушного движения. – Doc. 4444-RAC/501. – 13-е изд. – Монреаль, Канада, 1996. – 425 с.

4. Правила польотів повітряних суден та обслуговування повітряного руху у класифікованому повітряному просторі України: Затв. наказом Міністерства транспорту України від 16.04.2003 р. № 293. – К.: МТУ, 2003. – 52 с.

5. Безопасность полетов: Учеб. для вузов / *Сакач Р.В., Зубков Б.В., Давиденко М.Ф.* и др.; Под ред. Р.В. Сакача. – М.: Транспорт, 1989. – 239 с.

6. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (АП-25). – Авиационные правила. – Часть 25. – М.: МАК, 1994. – 345 с.

7. *Лейченко С.Д., Малышевский А.В., Михайлик Н.Ф.* Человеческий фактор в авиации: Монография в 2-х книгах. – Кировоград, 2006. – 512 с.

8. *Шеридан Т.Б., Феррелл У.Р.* Системы человек-машина: Модели обработки информации, управления и принятия решений человеком-оператором. – М.: Машиностроение, 1980. – 400 с.

9. *Шмельова Т.Ф., Сікірда Ю.В.* Моделювання процесу прийняття рішень людиною-оператором авіаційної ергатичної системи з урахуванням впливу психофізіологічних та суспільно-психологічних факторів // Наукові праці академії: Зб. наук. пр. – Кіровоград: ДЛАУ, 2007.– Вип. XII. – С. 342-355.

УДК 629.7.05

*Н.А. Михалочкин, д.т.н., Р.В. Газдюк, Касем Аббуд Махди, аспирант*
*(Национальный авиационный университет, Украина)*

# ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ РЕЖИМ И АВТОМАТИЧЕСКОЕ ЗАВИСИМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ В СИСТЕМЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЙ

*Выполнен анализ основных систематических погрешностей комплексных радионавигационных систем, основанных на использовании искусственных спутников Земли, рассмотрены дифференциальный метод и метод автоматических зависимых наблюдений применительно к системам межсамолётной навигации и предупреждения столкновений самолётов в воздухе*

Комплексные радионавигационные системы, основанные на использовании искусственных спутников Земли (ИСЗ) – это спутниковые навигационные системы (СНС) GPS, ГЛОНАСС, GNSS, EGNOS, Галилео и др. благодаря своей высокой эффективности стали в последние годы одним из основных элементов интегрированных навигационных комплексов (ИНК) подвижных объектов различного назначения.

Современные СНС представляют собой сложные радиоэлектронные комплексы (РЭК), использующие последние достижения математики, радиотехники, электроники и вычислительной техники.

Основными достоинствами СНС по сравнению с другими видами навигационных систем (НС) являются: глобальность, то есть способность обслуживать большие территории, вплоть до всего около земного пространства; всепогодность, независимость от времени суток и года; высокие точность навигационных обсерваций и быстродействие; доступность, непрерывность, целостность и неограниченная пропускная способность.

Применение СНС непрерывно расширяется. К настоящему времени они включаются в качестве одной из основных систем почти во все ИНК воздушных кораблей (ВК) и морских судов, используются в системах управления воздушным движением, на мобильных наземных объектах. Наконец, хорошо известно широкое применение СНС для нужд геодезии, картографии и в военных целях.

Трансформировался и продолжает совершенствоваться дифференциальный режим (ДР) НС дальней навигации применительно к СНС.

В основе метода дифференциальной навигации лежит относительное постоянство значительной части погрешностей НС во времени и в пространстве. Необходимость использования дифференциального режима в СНС определяется стремлением удовлетворить наиболее жёстким требованиям навигационного обеспечения таких задач, как полёт на малых высотах с огибанием рельефа местности, посадки ВК по категориям ИКАО, межсамолётной навигации (МСН) и предупреждения столкновений самолётов (ПСС) в воздухе и с Землёй (ПСЗ), мореплавание в узостях, шлюзование и т. п.

Первые исследования [1,2] показали возможность снижения погрешностей в среднеквадратических значениях (СКЗ) определения координат по системе GPS с 20 до 5 м и высоты с 40 также до уровня 5м.

Дифференциальный режим СНС предполагает наличие как минимум двух приёмоизмерителей (ПРМИЗМ): контрольно-корректирующая станция $П_1$ и потребитель $П_2$ в двух точках 1 и 2 пространства, причём $П_1$ геодезически точно привязан к принятой системе координат (ПЗ-90 или WGS-84). Разности между измеренными $П_1$ и рассчитанными в нём значениями псевдодальностей (ПД) «видимых» ИСЗ, а также разности соответствующих псевдоскоростей (ПСК) по линии передачи данных (ЛПД) передаются $П_2$ , в котором они вычитаются из измеренных $П_2$ ПД и ПСК. Применение ЛПД по сути приводит к привлечению метода автоматически зависимых наблюдений (АЗН).

***Автоматическое зависимое наблюдение*** (**ADS**)-метод наблюдения, при котором ВК автоматически по ЛПД выдает (получает) информацию из бортовой системы навигации и определения местоположения, включая опознавательный индекс ВК, четырехмерное местоположение, а также соответствующие дополнительные данные, в том числе и дифференци-

альные поправки. Если погрешности определения ПД слабо изменяются во времени и в пространстве, то они существенно компенсируются переданными по ЛПД поправками.

Основными слабо меняющимися погрешностями определения ПД в СНС являются: погрешности синхронизации; погрешности за счёт ошибок эфемеридного обеспечения; нескомпенсированные ионосферные погрешности и редко упоминаемые аберрационные погрешности $\Delta\lambda a$, связанные с вращением Земли.

При использовании ИСЗ для навигационных определений на поверхности Земли или вблизи нее, на ВК знания параметров движения ИСЗ в плоскости орбиты недостаточно, так как Земля непрерывно вращается относительно этой плоскости. Видимые трассы (рис.1) оказываются смещёнными относительно истинных на 0,05...1 угл. сек (высоты орбит $H_{орб}$ =1000...20000км)

$$\Delta\lambda a = 5.10^{-5} H_{орб}\,[км].$$

Погрешности синхронизации постоянны и весьма стабильны на рассматриваемых временных интервалах. Нестабильность бортового эталона частоты и времени (БЭВЧ) ИСЗ порядка $10^{-14}$ или $10^{-13}$ за час изменяет погрешность ПД пренебрежимо мало от 0,01м до 0,1м.

Эфемеридные погрешности навигационно-временных обсерваций вызваны неточностью определения и прогнозирования параметров орбит ИСЗ. Их значения составляют величины порядка 0,6...2м для GPS.

Вторая группа погрешностей вызвана неоднородностью условий распространения радиоволн в атмосфере (тропосфере и ионосфере). Дополнительная задержка сигнала в тропосфере может достигать 8...80 нс (экспериментальные данные по GPS). Учёт ионосферных погрешностей позволяет уменьшить их до единиц м.

Информация от СНС и радиообмена лежит в основе принципа действия системы предупреждения столкновений (СПС) самолётов в воздухе, состоящего в вычислении относительных координат и скоростей между взаимодействующими (конфликтующими) ВК по навигационным данным СНС ГЛОНАСС/GPS, передаваемых с борта на борт друг другу по ЛПД, образованной штатными радиостанциями МВ-ДЦВ диапазонов [3].

Так воплощается **ADS** метод для решения задач МСН и ПСС.

**ADS**-метод и ДР навигационных систем для относительной навигации практически эквивалентны в виду того, что взаимодействующим (конфликтующим) ВК, находящимся в ограниченной размерами области воздушного пространства, присущи мало отличающиеся и медленно меняющиеся во времени и в пространстве погрешности. Как и в ДР они существенно компенсируются переданными по ЛПД одноимёнными координатами при **ADS**-методе наблю,

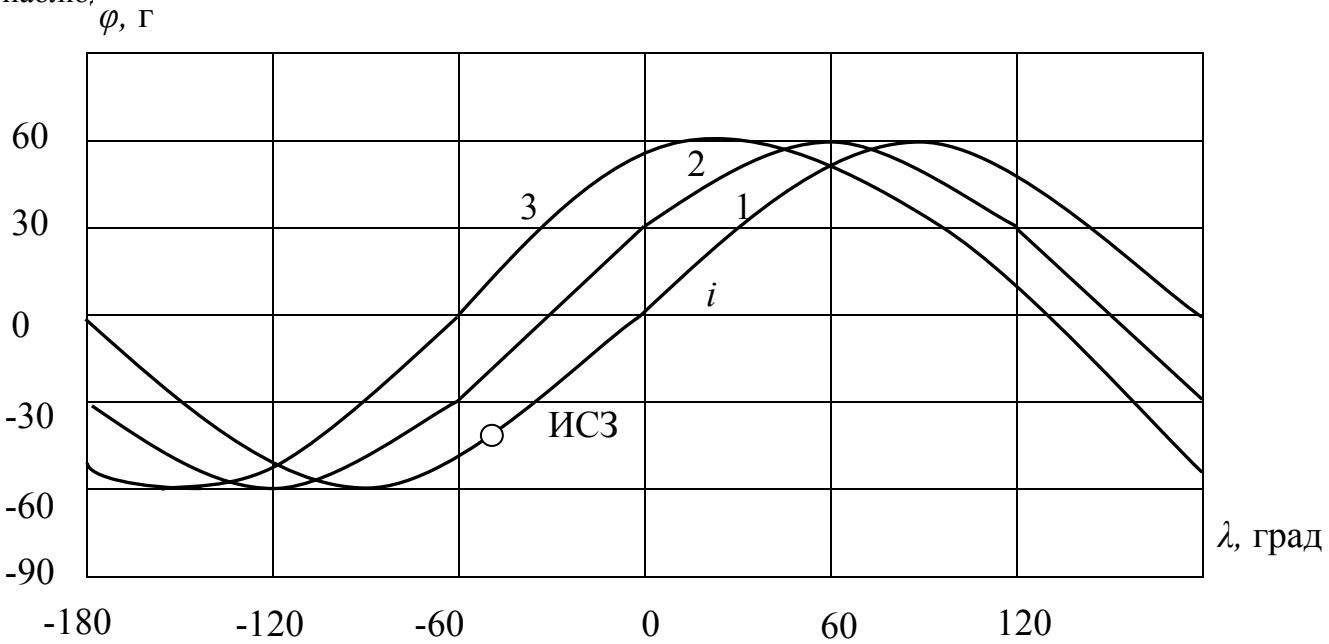



Рис.1.Трассы ИСЗ на низкой круговой орбите с углом наклона 60° при неподвижной Земле

Блок-схема взаимодействия двух ВК и образования ИНК представлена на рис.2. Для определения относительных координат предполагается наличие также двух ПРМИЗМ в ИНК. Комплекс предназначен для определения трех переменных в различных системах координат (СК) и составляющих скорости ВК по данным измерений дальностей, или ПД (квазидальностей) между ИСЗ и ВК. К числу потребителей комплекса относятся морские, а также наземные объекты (подвижные и неподвижные). В зависимости от типа потребителя требования к точностным характеристикам, числу измеряемых координат и составляющих скорости, допустимому времени вхождения в синхронизм, массогабаритным показателям и стоимости аппаратуры потребителя колеблются в широких пределах. Для наземных и морских объектов достаточно ограничиться измерением двух координат, двух составляющих скорости и их обменом. Для летательных аппаратов число измеряемых координат и составляющих скорости, подлежащих обмену, увеличивается до шести, восьми. При этом применяются алгоритмы статистического сглаживания быстро флюктуирующих погрешностей на основе известной информации о модели динамики потребителя и наблюдений. Обычно в этих целях используются различные разновидности фильтра Калмана. Причём размерность вектора состояния ВК, как правило, не менее восьми (три координаты, три составляющие скорости, систематические погрешности фазы и частоты опорного генератора (ОГ).

Представляет интерес дополнительное расширение вектора состояния ВК за счёт учёта трёх составляющих ускорения, а также погрешностей параметров бортовых навигационно-пилотажных комплексов.

Положительный эффект достигается при учете в модели результатов доплеровских измерений [3].

С борта каждого ИСЗ системы ГЛОНАСС/GPS излучаются два взаимно когерентные фазоманипулированные (ФМ) колебания на несущих частотах 1575,42 и 1227,6 МГц. Использование двух несущих частот преследует возможность вычисления и учета поправок на распространение радиоволн в ионосфере. В СНС ГЛОНАСС/GPS применяют два дальномерных сигнала: сигнал высокой точности (ВТ) и сигнал пониженной точности (ПТ).

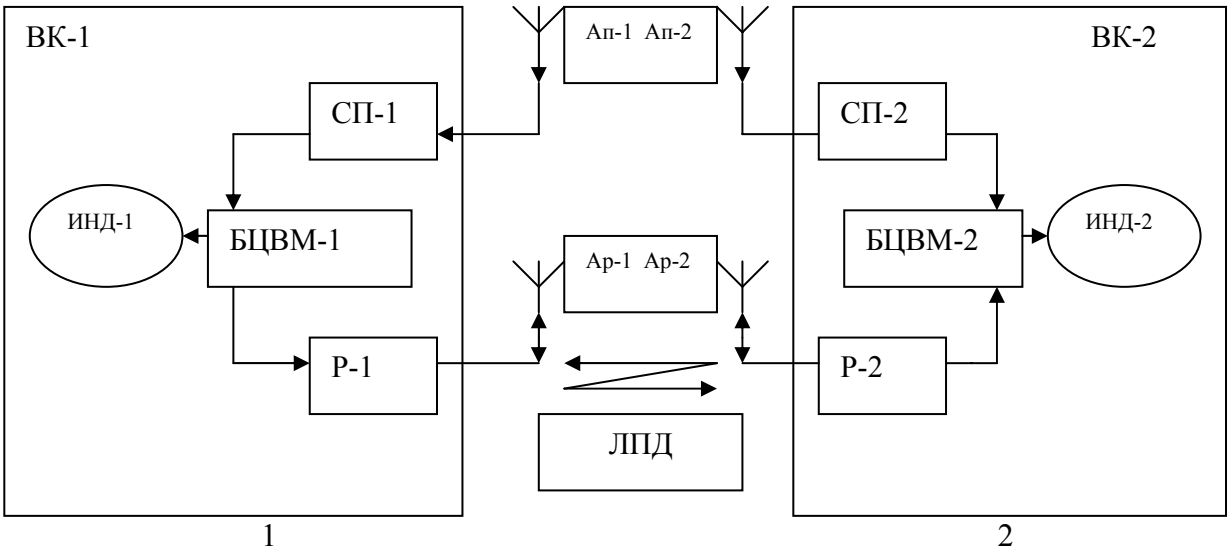



Рис.2. Блок-схема взаимодействия двух ВК: Ап- антенна приемная,
Ар- антенна радиостанции (р),СП- спутниковый приемник, ИНД- индикатор

Сигнал ВТ формируется манипуляцией фазы несущей частоты (1575,42 МГц) на ±90º, а сигнал ПТ – манипуляцией той же несущей на 0º и 180º. Ортогональность (квадратура) сигналов ВТ и ПТ обеспечивает возможность их полного разделения на борту потребителя. На частоте 1227,6 МГц излучается только ВТ-сигнал. Поэтому устранение ионосферной рефракционной погрешности возможно только для потребителей, располагающих аппаратурой

обработки ВТ-сигнала. Для простоты изложения остановимся на сигнале ПТ. Сигнал ПТ, излучаемый i-м ИСЗ на частоте $f_0$ = 1575,42 МГц, можно представить в виде

$$s_i(t) = XG_i(t)\, D_{ci}(t) \sin 2\pi f_0 t, \qquad (1)$$

где $XG_i(t)$ – дальномерный код в виде двоичной ФМ-последовательности (длительность символа дальномерного кода $T_0 \approx 1$мкс); $D_{ci}(t)$ – код данных (информационное сообщение), принимающий значения ±1 при скорости передачи 50 бит/с (длительность символа кода данных равна 20мс). Код $XG_i(t)$ является последовательностью Голда. Каждая такая последовательность образуется путем перемножения двух специально подобранных двоичных М-последовательностей одной и той же длины N (N=1023). При различных временных сдвигах перемножаемых М-последовательностей получаются различные последовательности Голда. Каждому ИСЗ в системе присвоена своя, индивидуальная последовательность Голда.

Основными задачами, решаемыми аппаратурой потребителя, являются: выбор рабочего созвездия ИСЗ, введение в синхронизм систем слежения по времени запаздывания и фазе несущей частоты дальномерных сигналов, измерение времени запаздывания и доплеровского сдвига частоты, выделение и расшифровка содержания навигационного (информационного) сообщения, расчет координат ИСЗ на момент навигационных измерений, решение навигационной задачи (определение координат и составляющих вектора скорости потребителя, поправок к сдвигу шкал времени и частот), отображение вычисленных данных на информационном табло.

В результате радиообмена навигационной информацией о пространственном положении и движении каждого ВК определяются взаимные координаты. С помощью ИНК определяется прежде всего пространственное положение самолета (ППС). Располагая информацией о координатах ВК вычисляются элементы движения – путевая скорость, углы ориентации ВК в пространстве и вокруг центра масс. Определение ППС осуществляется с использованием БЦВМ и переменные состояния могут быть вычислены в любой СК. Для вычисления в БЦВМ относительных координат i, d, Δh и скоростей Vi, Vd, VΔh на каждом ВК определяются разности координат и составляющих векторов скорости

$$i_j = x_{c_1} - x_{c_2}, \quad V_{ij} = V_{ic_1} - V_{ic_2},$$
$$d_j = y_{c_1} - y_{c_2}, \quad Vdj = Vdc1 - Vdc2,$$
$$\Delta h_j = z_{c_1} - z_{c_2}, \; V_{\Delta hj} = V_{\Delta hc_1} - V_{\Delta hc_2}, \; j = \overline{1,2},$$

где *j*- номер ВК.

Алгоритм вычисления относительных координат и скоростей будет иметь вид

$$\begin{aligned}
&\left|(Д_{ic_1} + \Delta Д_{c_1})^2 - (Д_{ic_2} + \Delta Д_{c_2})^2\right| = \left|(x_{иi} - x_{c_1})^2 + (y_{иi} - y_{c_1})^2 + (z_{иi} - z_{c_1})^2\right. \\
&\left. - (x_{иi+4} - x_{c_2})^2 - (y_{иi+4} - y_{c_2})^2 - (z_{иi+4} - z_{c_2})^2 \right|, \quad i = \overline{1,4};\; i{+}4 = \overline{1,4}. \\
&\left|Д'_{ic_1} - Д'_{ic_2} + \Delta Д'_{c_1} - \Delta Д'_{c_2}\right| = \left|Д_{ic_1} + \Delta Д_{c_1}\right|^{-1}[(x_{иi} - x_{c_1})(x'_{иi} - x'_{c_1}) + \\
&+ (y_{иi} - y_{c_1})(y'_{иi} - y'_{c_1}) + (z_{иi} - z_{c_1})(z'_{иi} - z'_{c_1})] - (Д_{ic_1} + \Delta Д_{c_2})^{-1}[(x_{иi+4} - x_{c_2}) \times \\
&\times (x'_{иi+4} - x'_{c_2}) + (y_{иi+4} - y_{c_2})(y'_{иi+4} - y'_{c_2}) + (z_{иi+4} - z_{c_2})(z'_{иi+4} - z'_{c_2}) \left|, \; i = \overline{1,4}, \; i{+}4 = \overline{1,4}.\right.
\end{aligned} \qquad (2)$$

ИСЗ из созвездия $i=\overline{1,4}$ одного ВК могут совпадать с ИСЗ из созвездия $i+4=\overline{1,4}$ другого ВК. Значения поправок к координатам $\Delta Дc_1$ и $\Delta Дc_2$, а также – поправок к радиальным скоростям ВК-1 и ВК-2 соответственно $\Delta Д'c_1$ и $\Delta Д'c_2$ могут быть равными и радиообмен может осуществляться тремя дальностями и радиальными скоростями. Кроме того, левые части выражений (2) упрощаются к виду

$$\left|(Д_{ic_1} + \Delta Д_{c_1})^2 - (Д_{ic_2} + \Delta Д_{c_2})^2\right| = \left|(Д_{ic_1} - Д_{ic_2})(Д_{ic_1} + Д_{ic_2} - 2\Delta Д)\right|, i = \overline{1,3};$$

$$\left|Д'_{ic_1} - Д'_{ic_2} + \Delta Д'_{c_1} - \Delta Д_{c_2}\right| = \left|Д'_{ic_1} - Д'_{ic_2}\right| \text{ , } i=\overline{1,3} .$$

Таким образом, ИНК позволяет производить поиск, обнаружение и управление взаимодействующими (конфликтующими) ВК с целью предупреждения и предотвращения столкновений по данным радиообмена. Радиус действия системы равен 400 км и, благодаря ее высокой точности, минимальное удаление между ближайшими самолетами составляет 50 м. Точность определения относительных координат равны 0,2...0,5 м и относительной скорости не хуже 0,005...0,01м/с.

## Список литературы


1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/Под ред. *В.Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина.*- М.: ИПРЖР, 1998.- 400 с.

2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования/ Под ред. *А.И. Перова, В.Н. Харисова.* Изд.3-е, перераб. – М.: Радиотехника,2005.- 688с.

3. *Белкин В.В., Михалочкин Н.А., Харченко В.П.*//Системы предотвращения столкновений, основанные на использовании информации от СРНС и радиообмена.- Вісник НАУ,2006.-N3.-С.86-92.

4. *Міхалочкін М.А., Харченко В.П.*//Принцип відносності в навігації на прикладу допплерівського вимірника швидкості.- Проблемы транспорта: Зб.наук пр. -Вып.2.-К.:НТУ,2006.-С.196-203.

УДК 629.7.07

*І.Л. Якуніна, аспірант, Т.Ф. Шмельова, к.т.н., доцент*
*(Державна льотна академія України, Україна)*

# МОДЕЛЬ РОЗВИТКУ АВАРІЙНОЇ СИТУАЦІЇ У ВИПАДКУ ЗІТКНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СУДНА З ПТАХОМ, НА ЕТАПІ ЗЛЬОТУ

*Розглянуто модель розвитку аварійної ситуації на прикладі зіткнення повітряного судна з птахом на етапі зльоту. Побудовано фрагмент блок-схеми розвитку аварійної ситуації при зіткненні з птахом n-моторного повітряного судна при зльоті. На основі моделі проблемної ситуації в системах управління повітряним рухом побудовано модель аварійної ситуації у випадку зіткнення повітряного судна з птахом на етапі зльоту.*

Однією з цілей аналізу аварійних ситуацій в авіації є отримання висновків про правильність або ефективність реакції системи (спрацьовування захисних засобів, дій авіаспеціалістів і тому подібне) на руйнівні дії небезпек, що виникли. Аварійна ситуація розгортається в часі і, як правило, не може розглядатися як одномоментна подія.

У зв'язку з цим виникає проблема розробки «моделі аварії» — узагальненої схеми виникнення і розвитку аварійної ситуації, застосування якої до конкретних аварій сприяло б виявленню чинників і дій, що зумовили спричинення збитку (або, навпаки, його запобігання або скорочення) на кожному етапі розвитку подій.

У практичній роботі по попередженню аварійності дуже важливо ретельно продумувати усі “шляхи”, які можуть привести систему в небезпечний стан. Це дозволяє:

- чітко визначити в кожному випадку поняття небезпечного стану;
- прийти фахівцям до єдиного тлумачення, чого ж слід побоюватися в першу чергу;
- більшою мірою врахувати всі обставини і способи переходу системи в небезпечний стан;
- розглядати як причини аварій не лише вплив конкретних компонентів середовища та техніки, але і дії людей [6].

В процесі розвитку негативного явища, яке завершується авіаційною подією, в більшості випадків можуть мати місце декілька причин, що послідовно ускладнюють ситуацію, що в результаті приводить до авіаційної події. Таким чином, авіаційна подія в більшості випадків подія складна і є замикаючою в ланцюжку послідовних подій, що мають причинно-наслідкові зв’язки.

За ступенем небезпеки особливі умови польоту поділяються на ускладнення умов польоту, складну, аварійну та катастрофічну ситуації [1].

Розглянемо модель розвитку аварійної ситуації на прикладі зіткнення повітряного судна з птахом на етапі зльоту.

Зіткнення з птахом(ами) не входить до переліку основних причин авіакатастроф. Проте Міжнародна організація цивільної авіації (ІКАО) щороку реєструє в світі приблизно 5400 випадків зіткнень літаків та птахів. На сьогоднішній день bird strike є одним з найбільш небезпечних типів повітряних інцидентів. Як свідчить статистика, за останні двадцять років саме через зіткнення повітряного судна з птахом загинуло 194 людини. Лише авіації Сполучених Штатів такого роду аварії нанесли більше 2 млрд. дол. збитку[3].

Перше зареєстроване зіткнення літака з птахом сталося 1912 р., коли в Каліфорнії в результаті попадання чайки в рульове управління, загинули машина і пілот.

З появою в 50-і роки турбореактивних двигунів наслідки таких зіткнень стали ще небезпечнішими, тому що досить одного птаха, який, будучи втягнутим в двигун, розриває декілька його лопатей, що надалі приводить до руйнування інших лопатей (ефект доміно), а потім компресора, падінню потужності, що може привести до драматичних наслідків, перш

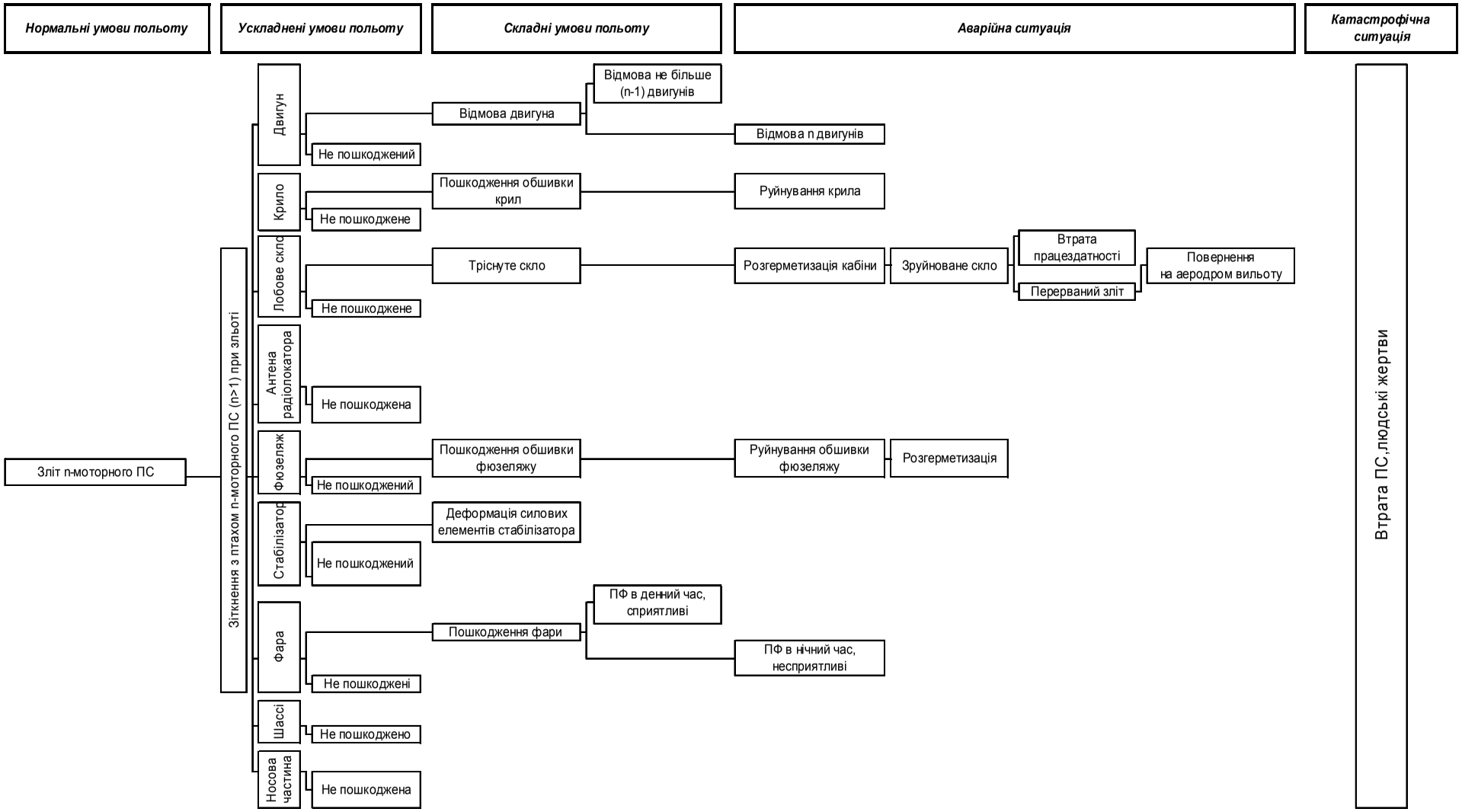



Рис. 1 Фрагмент блок-схеми розвитку аварійної ситуації при зіткненні з птахом n-моторного повітряного судна при зльоті

за все у фазі зльоту, коли літак знаходиться в стані повного навантаження і вимагає повної рівномірно розподіленої потужності своїх двигунів, аби відірватися від землі.

В залежності від місця удару аварійна ситуація, розвиватиметься по різному (рис 1).

Птах може пробити обшивку фюзеляжу і крил, потрапити в двигун, пошкодити скло кабіни [3, 5, 7].

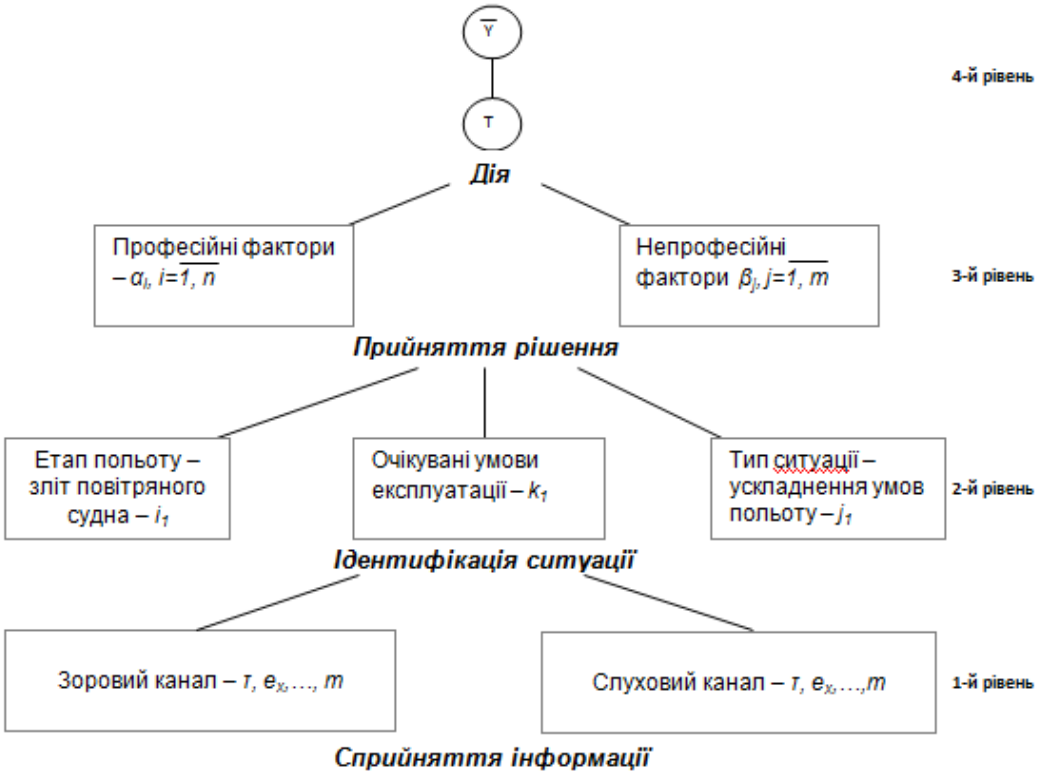



Рис. 2 Модель прийняття рішень авіадиспетчером у випадку зіткнення повітряного судна з птахом на етапі зльоту

Модель аварійної ситуації у випадку зіткнення повітряного судна з птахом на етапі зльоту.

Для побудови даної моделі візьмемо за основу модель проблемної ситуації в системах управління повітряним рухом[4].

Дану проблемну ситуацію, вирішувану людиною-оператором (Л-О), можна сформулювати у вигляді моделі, що описується кортежем:

$$\overline{C} = \left\{\overline{A}, \overline{U}, \overline{\Lambda}, \overline{H}, \overline{G}, \overline{Y}, \overline{K}\right\}, \quad (1)$$

де $\overline{C}$ – ситуація;

$\overline{A}$ – множина стратегій авіадиспетчера, як людини, що приймає рішення (ЛПР) при виникненні ситуації зіткнення повітряного судна з птахом на етапі зльоту;

$\overline{U}$ – множина значень визначених факторів (наприклад, система трас, план польотів тощо), що впливають на прийняття рішення ЛПР;

$\overline{\Lambda}$ – множина подій, що є наслідками зіткнення з птахом (ймовірна величина, для оцінювання ризику прийняття рішення);

$\overline{G}$ – множина результатів діяльності авіадиспетчера;

$\overline{Y}$ – вектор дій (прогнозування ризику прийняття рішення);

$\overline{H}$ – модель (відображення), що ставить у відповідність множинам стратегій $\overline{A}$ та факторів $\overline{\Lambda}$ множину результатів Y(G);

$\overline{K}$ – критерії ефективності (мінімізація збитків при прийнятті рішення, максимізація безпеки польотів, мінімізація часу для прийняття рішення авіадиспетчером);

Задача вибору найкращої стратегії $a^* \in \overline{A}$ є ядром дослідження ефективності діяльності Л-О та вирішується на основі співставлення усіх допустимих стратегій $a \in \overline{A}$ за визначеними критеріями ефективності[4].

Модель прийняття рішення авіадиспетчером у випадку зіткнення повітряного судна з птахом на етапі зльоту (рис. 2).

Авіадиспетчер сприймає основну інформацію через зоровий і слуховий канали. Час на сприйняття інформації залежить від індивідуального показника затримки сенсорної реакції авіадиспетчера $\tau$, ергономічних характеристик обладнання $e_x$ тощо.

Наприклад, ідентифікація ситуації у випадку зіткнення повітряного судна з птахом, залежить від етапу польоту – зліт повітряного судна, умов експлуатації повітряного судна ($\kappa_1$ – очікувані умови експлуатації), а також типу польотної ситуації ($j_1$ – ускладнення умов польоту).

На прийняття рішення впливають також фактори професійного та непрофесійного характеру[8].

## Висновки:

1. Виокремлено проблему розробки «моделі аварії»» — узагальненої схеми виникнення і розвитку аварійної ситуації.
2. Побудовано фрагмент блок-схеми розвитку аварійної ситуації при зіткненні з птахом n-моторного повітряного судна при зльоті.
3. На основі моделі проблемної ситуації в системах управління повітряним рухом побудовано модель аварійної ситуації у випадку зіткнення повітряного судна з птахом на етапі зльоту.
4. Побудовано модель прийняття рішення авіадиспетчером у випадку зіткнення повітряного судна з птахом на етапі зльоту.

## Список літератури


1. Безопасность полетов: Учебник для вузов / *Р.В.Сакач, Б.В.Зубков, М.Ф.Давиденко и др.*; Под ред. Р.В.Сакача. - М.: Транспорт, 1989. - 239 с.
2. *Картамышев П.В., Тарасов А.К.* Методика летного обучения: Учебник для вузов гражданской авиации. - М.: Транспорт, 1974. - 312 с.
3. *Марченко Р.* «Bird strike» и компенсация убытков — практические аспекты [Електронний ресурс] . – Режим доступу: http://www.wing.com.ua/content/view/4059/52/
4. *Рева А.Н., Селезнев Г.Н.* Модель проблемной ситуации в системах управления воздушным движением // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – №6. – С. 30-35
5. Руководство по орнитологическому обеспечению полетов в гражданской авиации: Утв. М-вом гражд. авиации СССР и введ. в действие с 01.05.89. – М.: Воздуш. транспорт, 1989. 32 с.
6. *Рябинин И.* Надежность, живучесть и безопасность кораблей. // Мор. сборник. - 1987.- № 8. - С. 62-65
7. *Сікірда Ю. В.* Моделювання системи підтримки прийняття рішень авіадиспетчера в позаштатних польотних ситуаціях: Дис. канд. техн. наук: 05.13.06 ; - Захищена 09.06.2004. - К., 2004. – 184 с.: іл.-Бібліогр.:с.83-85.
8. *Шмельова Т.Ф. , Сікірда Ю.В.* Моделювання процесу прийняття рішень людиною-оператором авіаційної ергатичної системи з урахуванням впливу психофізіологічних та суспільно психологічних факторів // Наукові праці академії: Зб. наук. пр. – Кіровоград: ДЛАУ, 2007. – Вип. XII – С. 342-355

УДК 629.735.067(0432)

*О.С. Слюняєв, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ЗАГАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ АЕРОНАВІГАЦІЇ

Питанням захисту інформації людство надавало велике значення з самого початку використання інформаційних процесів, тобто з надзвичайно давніх часів. З роками інформаційні технології та системи все більше розвиваються, набувають все більшого значення. Всебічно вдосконалюються методи та засоби несанкціонованого втручання в інформаційні процеси. Тому потреба у захисті інформації все більше зростає і являє собою проблему наукового, організаційно-технічного характеру тощо.

Методи захисту інформації в системах організації повітряного руху (ОрПР) використовуються та вдосконалюються теж з часу їх появи. Але оскільки ці системи весь час розвиваються, з'являються нові дестабілізуючи фактори, вдосконалюються методи та засоби несанкціонованого втручання в інформаційні процеси,

При розробці інформаційних систем слід передбачити необхідність забезпечення цих властивостей системи через чітко сформульовані вимоги до неї. Для підтримання запланованих властивостей інформаційної системи слід проводити періодичний контроль їх фактичного рівня. Крім цього, необхідно передбачити надійний захист інформації яка циркулює в системі ОрПР.

Ефективний захист інформації полягає не в тому, що боротьба із загрозами здійснюється під час їх прояву, а в тому, щоб інформаційній системі були притаманні такі завчасно надані властивості, які б виключали можливості реалізації будь-яких загроз. Тобто по суті це не боротьба з загрозами, а впровадження заходів щодо ліквідації вразливостей системи, якими могли б скористатися потенційні загрози, наслідками яких можуть бути перекручення чи знищення інформації, несанкціоноване її використання.

Заздалегідь передбачити появу тих чи інших загроз, своєчасно запобігти їх впливу вдається не завжди, але саме такий принцип захисту інформації повинен бути в основі комплексу заходів щодо вирішення цієї задачі.

Кожна інформація має свою цінність. Вона залежить від витрат, яких вимагає процес отримання та зберігання інформації та від вартості корисного ефекту, який може бути отриманий при використанні цієї інформації за призначенням. Різна інформація по-різному зберігає свою цінність у просторі і часі. Цінність, наприклад, інформації спостереження про стан повітряного руху , змінюється у часі і просторі. Це стосується багатьох динамічних систем. Існує інформація, цінність якої не змінюється чи змінюється незначно у плинності часу.

Бувають режими функціонування системи ОрПР, коли оброблювана в ній інформація не використовується деякий час за призначенням. Поява в цьому випадку загрози не викликає шкоди.

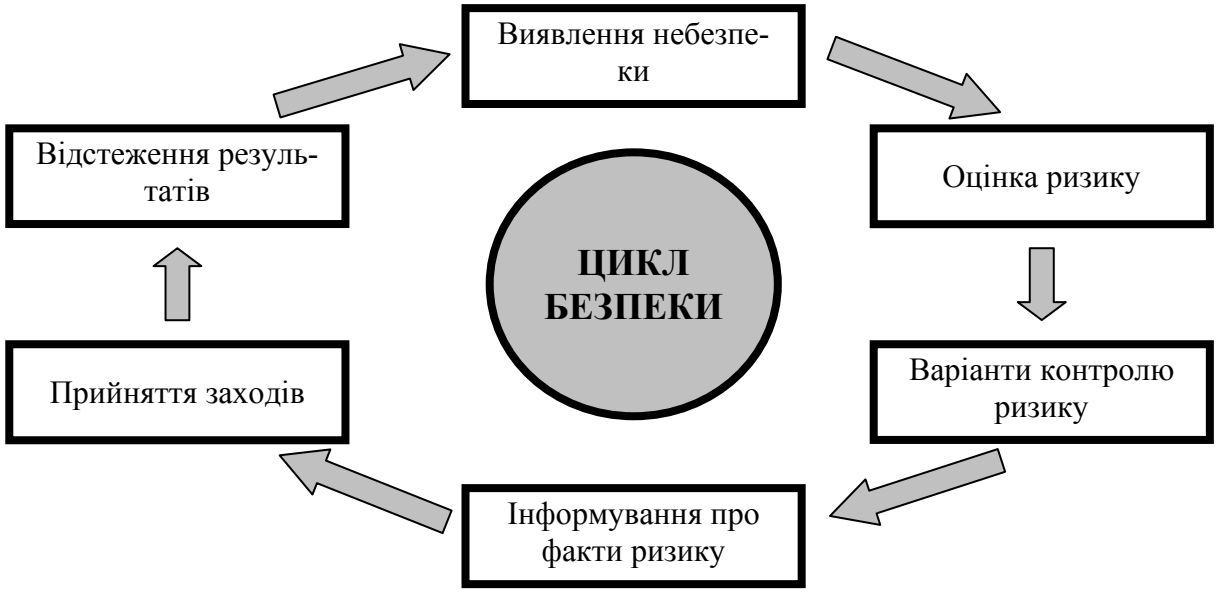
Від цінності та характеру зміни інформації залежать характеристики систем її захисту.

Довіра до інформації та можливі ризики залежать від її об'єктивності, захищеності, цінності та залежності від простору і часу.

Безпека є станом, при якому ризик спричинення шкоди особам або завдання шкоди майну знижений до прийнятного рівня і підтримується на цьому, або нижчому, рівні за допомогою безперервного процесу виявлення джерел небезпеки і контролю чинників ризику (Doc 9859 «Керівництво по управлінню безпекою польотів»).

Оцінка безпеки інформаційних технологій важливе у зв'язку з необхідністю захисту активів (інформації чи ресурсів, які використовуються в інформаційній системі). При цьому безпекою інформаційних технологій вважається властивість елементів інформацій-

ної технології (інформаційної системи) забезпечити схоронність активів. Ця властивість закладається в систему з моменту її розробки та повинна зберігатися до закінчення етапу її експлуатації. Оцінка безпеки інформації передбачає розробку критеріїв, методології та системи оцінки. Критерії оцінки інформаційної безпеки залежать від призначення інформаційної системи, вимог до неї, середовища, в якому функціонує ця система та ін.




мал. 1. Цикл безпеки

В інформаційних системах важливими є вимоги довіри до безпеки інформаційних технологій, які оцінюються використанням рівнів довіри за певною шкалою.

Знання кількісної міри довіри до безпеки інформації дозволяє приймати рішення щодо використання цієї інформації та розробки заходів щодо зменшення ймовірності наявності вразливостей, можливості їх появи, а також рівня шкоди яка може статися внаслідок прояву вразливостей. Знання цих характеристик дозволяє обмежити наслідки реалізації загроз, розробити заходи усунення вразливостей та загроз.

Надійність інформаційної системи пов’язана із здатністю передавати достовірно данні користувача від одного кінцевого обладнання даних до іншого. Вона включає в себе здатність відновлення після помилок чи втрати даних в інформаційній системі, включаючи відмову каналу, кінцевого обладнання даних, кінцевої апаратури каналу даних чи обладнання комутації даних.

Достовірність інформації – властивість інформації бути правильно сприйнятою.

Надійність також пов'язана з технічним обслуговуванням системи, яке включає щоденне тестування, профілактичне обслуговування, наприклад заміну тих, що відмовили або допустили збій компонент; діагностування несправності при несправностях. У разі виникнення несправності з будь-яким компонентом, мережева діагностична система може легко виявити помилку, локалізувати несправність і, можливо, відключити цю компоненту від інформаційної системи. Достовірність передачі даних відображає ступінь відповідності прийнятого повідомлення переданому. Оцінкою достовірності служить коефіцієнт помилок. У її функції входить підключення кінцевого обладнання даних до лінії або каналу передачі даних. Її основною функцією є комутація і маршрутизація трафіку в мережі до місця призначення. Іноді достовірність визначається як різниця між

одиницею і коефіцієнтом Р. Поява помилок при передачі інформації пояснюється або сторонніми сигналами, завжди присутніми в каналах, або перешкодами, викликаними зовнішніми джерелами і атмосферними явищами, або іншими причинами.

По своїй електричній структурі перешкоди – це коливання, схожі з сигналами, але невпорядковані і, звичайно, непотрібні. У приймачі перешкоди можуть подавити інформаційний сигнал, тобто ослабити настільки, що приймач або не виявить його, або сприйме як помилковий. Зокрема, в двійковому каналі одиниця може перейти в нуль і навпаки. При рівнозначній вірогідності появи таких переходів канал зв'язку вважається симетричним, інакше – несиметричним. У реальних умовах канали зв'язку зазвичай бувають несиметричними. Наявність перешкод в системі зв'язку приводить до великого числа невірно виконуваних обчислень неправильному читанню командних та управляючих посилок, зниженню ефективності інформаційної системи. Труднощі боротьби з перешкодами полягають в безладності, нерегулярності і в структурній схожості перешкод з інформаційними сигналами. Тому захист інформації від помилок і шкідливого впливу перешкод має величезне практичне значення і є однією з найважливіших проблем сучасної теорії і техніки зв'язку. Порушення або помилки можна широко класифікувати як випадкові, імпульсні і змішані. У каналах з випадковими помилками для кожного біта даних існує вірогідність Р неправильного прийому і Р-1 правильного прийому. Помилки відбуваються випадково в блоках прийнятих даних. Більшість каналів з речовинними носіями схильні до випадкових помилок. Канали з імпульсними помилками демонструють стан, вільний від помилок, велику частину часу, але іноді з'являються групові або разові помилки.

Для підвищення достовірності і якості роботи систем зв'язку застосовуються групові методи захисту від помилок, надмірне кодування і системи із зворотним зв'язком. На практиці часто використовують комбіноване поєднання цих способів. До групових методів захисту від помилок можна віднести давно вже використовуваний в телеграфії спосіб, відомий як принцип Вердана: вся інформація передається кілька разів, зазвичай не парне число разів (мінімум три рази). Інформація, що приймається, запам'ятовується спеціальним пристроєм і порівнюється. Думка про правильність передачі виноситься по збігу більшості з прийнятої інформації методами два з трьох, три з п'яти і так далі.

Інший метод, що також не вимагає перекодування інформації, припускає передачу інформації блоками, що складаються з декількох кодових комбінацій. В кінці кожного блоку посилається інформація, що містить кількісні характеристики переданого блоку, наприклад число одиниць або нулів в блоці. На приймальному кінці ці характеристики знов підраховуються, порівнюються з переданими по каналу зв'язку, і якщо вони співпадають, то блок вважається прийнятим правильно. При неспівпаданні кількісних характеристик на передавальну сторону посилається сигнал помилки.

Серед методів захисту від помилок найбільше розповсюдження одержало перешкодостійке кодування, що дозволяє одержати вищі якісні показники роботи систем зв'язку. Його основне призначення – вживання всіх можливих заходів для того, щоб вірогідність спотворень інформації була достатньо малою, не дивлячись на присутність перешкод або збоїв в роботі інформаційної системи.

Однією з простих форм перевірки помилок є так званий ехоплекс. Відповідно до цієї методики кожен символ, що посилається ПЕОМ по дуплексній лінії зв'язку видаленому абонентові, повертається назад до ПЕОМ у вигляді луни. Якщо ПЕОМ приймає той самий символ, що і був надісланий, вважається, що передача символу пройшла правильно. Якщо немає, значить, при передачі відбулася помилка і необхідна повторна передача цього ж символу. Іншим часто використовуваним на практиці методом є контроль на парність. Його суть полягає в тому, що кожна кодова комбінація додається один розряд, в який записується одиниця, якщо число одиниць в кодовій комбінації непарне, або нуль, якщо парне. При декодуванні підраховується кількість одиниць в кодовій комбінації. Якщо воно виявляється парним, то інформація, щонадійшла, вважається прави-

льною, якщо ні, то помилковою. Окрім перевірки по горизонталі контроль на парність і непарність може проводитися і по вертикалі. Переваги контролю на парність полягає в мінімальному значенні коефіцієнта надмірності і в простоті його технічної реалізації, а недолік – в тому, що виявляються помилки, що мають тільки непарну кратність. Проте така методика перевірки не може виявити помилки у разі подвійного перекидання (наприклад, дві одиниці перекинулися в нуль), що може привести до високого рівня помилок в деяких передачах.

З одного боку, чим більше надмірність коду, тим вище його завадостійкість і, відповідно, тим достовірніше передаватиметься інформація, тобто вірогідність невиявлення помилки буде нижча. З другого ж боку, чим вище вміст контрольних елементів в коді, тим вище буде його значність, а отже зросте час передачі даних по каналу, пропускна спроможність якого зменшиться. Це, безумовно, зробить систему менш привабливою для користувача і ефективність її впаде. У зв'язку з цим переважнішими вважаються коди з меншою надмірністю, оскільки надмірність безпосередньо пов'язана з ефективністю інформаційної системи. Також слід враховувати і те, що чим вище надмірність коду, тим складніше і дорожче повинні бути кодуючі і декодуючі пристрої, що є не менш важливим чинником, чим допустима пропускна спроможність каналу зв'язку, оскільки вартість устаткування повинна відповідати її необхідності, тобто повинна окупатися порівняно швидко.

Не виникає сумнівів, що такі складні системи як транспорт, транспортні засоби, система організації повітряного руху та інші створені і функціонують з використанням багатьох взаємопов'язаних між собою фізичних та інформаційних процесів.

Від нормального протікання цих процесів залежать важливі показники функціонування таких систем. Функціонування транспортних систем характеризується рядом критеріїв ефективності, серед яких соціальні, функціональні, економічні, технічні, інформаційні та ін.

За останнє століття авіація досягла значного розвитку. Цей прогрес був би неможливим без паралельних досягнень в галузях радіотехніки, метеорології, виробництва, комп'ютерної техніки, інформаційних систем та технологій.

Управління різноманітними технологічними процесами в авіації в наш час базується на використанні інформаційних систем, до яких відносяться джерела інформації, засоби її передачі, обробки, відображення, зберігання, загальне та спеціальне програмне забезпечення. У всіх інформаційних технологічних процесах, а також процесах управління, важливу роль відіграють люди.

Людина приймає безпосередню участь у розробці, виробництві та експлуатації інформаційних систем. Технологічний процес ОрПР поки що неможливий без участі людини, за якою залишається найбільш відповідальний процес прийняття рішень.

Оскільки людина бере участь на всіх стадіях існування та використання інформаційних систем, вона безпосередньо причетна до захисту інформації. З іншого боку, людина причетна до можливих загроз функціонуванню таких систем.

Інформація, яка використовується в системах ОрПР, потребує захисту у зв'язку з впливом значної кількості існуючих дестабілізуючих факторів. Ці фактори впливають на якість інформаційних систем на етапах їх розробки, виробництва, випробувань, використання за призначенням тощо. При використанні таких систем впливу дестабілізуючих факторів підпадають як авіадиспетчерський, так і інженерно-технічний персонал, обладнання та програмне забезпечення.

Дестабілізуючі фактори можуть мати природне та штучне походження. До дестабілізуючих факторів штучного походження відносяться, наприклад, завади промислового характеру, завади, які пов'язані з електромагнітною сумісністю різного роду систем. Штучні завади можуть мати ненавмисний та навмисний. В інформаційний процес можуть несанкціоновано втручатись злочинні елементи, використовуючи недостатню захище-

ність систем, сучасні технічні та програмні засоби, спеціально розроблювані методи втручання в інформаційні процеси ОрПР.

Система організації повітряного руху повинна бути інформаційно стійкою навіть при одночасному впливі декількох дестабілізуючих факторів, що повинно забезпечуватись при її розробці та використанні. Розробники багато уваги приділяють фізичним методам захисту інформації (методам завадозахищеності). Існує потреба в широкому розумінні забезпечення інформаційної захищеності систем організації повітряного руху.

Предметом сучасного інтересу розробників радіолокаційних систем є мультистатичні системи радіолокацій, які працюють з великим числом системи передбачаються надійнішими і захищенішими від електронних дій, чим моностатичні радіолокаційні системи. Тоді як ці властивості обумовлені роздільним резервуванням, підвищені характеристики мультистатических систем, по суті, витікають з, просторового рознесення схеми системи.

## Список використаної літератури


1. Безпека авіації / *В.П. Бабак, В. П. Харченко, В. О. Максимов* та ін.;

За ред. *В.П. Бабака*. – К.: Техніка, 2004. – 584 с.: іл. – Бібліогр.: с. 560–583.

2. Национальный план для систем CNS/ATM. Інструктивній матеріал. Монреаль, Канада. 1996.

3. Руководство по управлению безопарсностью полетов / ICAO. – Doc 9859 AN/460. – Издание первое – 2006. – 364 с.

4. http://ru.wikipedia.org/wiki/Комплекс_управления_воздушным_движением

УДК: 004.032.26:629.735.067(043.2)

*В.П. Харченко, доктор технічних наук*
*(Національний авіаційний університет, Україна),*
*О.М. Алєксєєв, аспірант (Державіаадміністрація, Україна)*

# ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПРИ УПРАВЛІННІ БЕЗПЕКОЮ ПОЛЬОТІВ

*В статті піднімається питання застосування нейромережевих технологій, які дозволять ефективно вирішувати задачу синтезу (прогнозування та управління ризиками) та виробити вектор управляючих дій щодо мінімізації впливу факторів ризику ів майбутніх польотах.*

Найбільш близьким аналогом спосібу управління безпекою польотів є застосування теорії імовірності, теорія нечітких множин, кореляційно-регресійнийого аналізу на основі яких може бути розроблена програмна реалізація управління і прогнозування ризиками в аеронавігаційній системі. Однак в реальних умовах інформація для прийняття рішень є неповною та недостатньо достовірною що впливає на безпеку систем, і застосування вищезазначених теорій не дають достовірного прогнозу.

Нейронно-мережева модель управління та прогнозування ризиками дозволить ефективно вирішити задачу синтезу виникнення ризику та видати вектор управляючих сигналів мережі по неповної та спотвореної інформації про явища, події та процеси, що впливають на безпеку польотів (далі – БП).

Передбачаючи, що характер взаємозв'язку між заданими параметрами ще деякий час не зміниться, експерт може використовувати настроєну та навчену нейронну мережу (далі-НМ) для короткочасного/довгочасного прогнозування та напрацювання управлінських рішень (далі – УР)[3,4].

Мережа складається з двох шарів, які мають по *m* нейронів, де *m* — число зразків, визначених сукупністю можливих «ризиків».

Нейрони першого шару мають по *n* синапсів, з'єднаних з входами мережі. На вхід мережі подається невідомий вектор розмірність якого визначається потоком інформації о явищах, подій, дій та процесів, що впливають на БП.

У загальному випадку НМ здійснює наступні перетворення:

$$S : X \Rightarrow A, ;\ H : A \Rightarrow A',\ P : A' \Rightarrow y, \tag{1}$$

де *X*- *n* мірний простір неперервних вхідних сигналів; *A*-*n* –мірний простір асоціацій, А - перетворене алгоритмом хешування простір асоціацій *y* - вектор вихідних сигналів.

Перетворення відповідає кодуванню інформації $a = S(x)$ хешуванню $a' = H(a)$ обчисленню вихідного сигналу

$$y = P(a') = (a')^T \omega = (H)a))^T \omega \ . \tag{2}$$

Важливим питанням при реалізації мережі є вибір базисних функцій.

Вираз описує перетворення, здійснюване в традиційній НМ використовуванням хешування інформації при виборі прямокутних базисних функцій [2]. Якщо в мережі використовуються нейрони з активаційними функціями, відмінними від прямокутної, перетворення приймає вигляд

$$y = H\ (a^T \Phi\ (x))\ \omega\ , \tag{3}$$

$$\Phi(x) = \begin{bmatrix} \Phi_1(x) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \Phi_2(x) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \Phi_n(x) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $\Phi_i(x) = \prod_{j=1}^{N} \phi_{ij}(x_j); \phi_{ij}(x_j)$ - значення вибраної базисної функції в точці.

У розробленої НМ використовуються прямокутні базисні функції, що дозволяє здійснювати постійну апроксимацію. В цьому випадку обчислювальні витрати будуть мінімальними, унаслідок чого значно скорочується час реакції мережі на вхідний сигнал, що поступив.

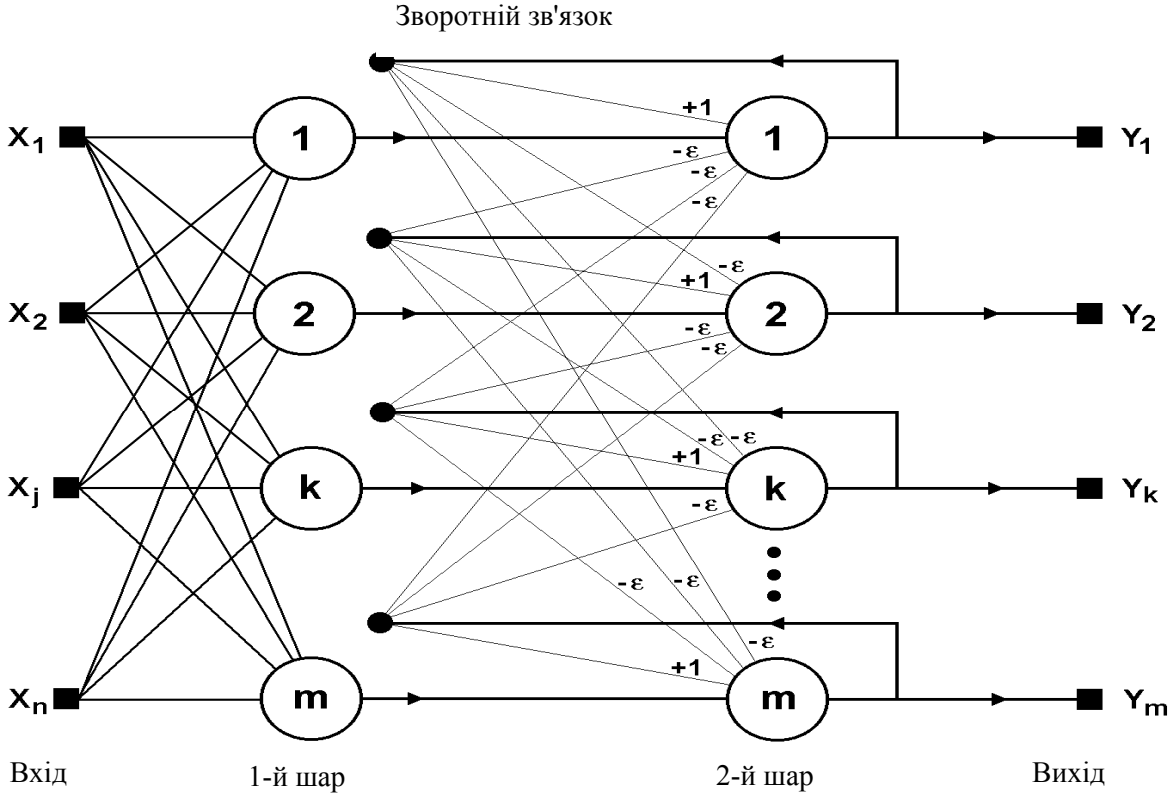



Рис 1. Нейронна мережа аналітичної автоматизованої системи управління безпекою польотів.

Компоненти вектора асоціацій можуть приймати значення 0 або 1. Швидкість навчання мережі при виборі базисних функцій прямокутної форми буде максимальною.

Як базисні в мережі використовуються Гаусовські функції [1,8], які

$$\Phi_i(x_j) = \exp\left\{-\frac{(x_j - \mu_i)^2}{\sigma_i^2}\right\}, \quad (5)$$

володіють властивістю локального збудження, достатньо складно чітко виділити межі її збудження, так і можна достатньо чітко виділити межі її збудження, що є важливим для здійснення кодування інформації в НМ. Цього недоліку позбавлена Гаусівська функція.

$$\Phi_i(x) = \begin{cases} \exp\left\{ - \dfrac{(\lambda_2 - \lambda_1)^2 / 4}{(x - \lambda_1)(\lambda 2 - x)} \right\} \text{ при } x \in (\lambda_1, \lambda_2); \\ 0 \end{cases} \quad (6)$$

і тригонометрична (косинусоїдальна)

$$\Phi_i(x_j) = \begin{cases} \cos\left( \dfrac{\pi}{\rho r_j}(x_j - \lambda_i) \right) \text{ при } x_j \in (\lambda_i - \dfrac{\rho r_j}{2}, \lambda_1 + \dfrac{\rho r_j}{2}) , \\ 0 \end{cases} \quad (7)$$

де – центр області квантування, куля квантування по компоненті вхідного сигналу. Нейрони другого шару пов'язані між собою заперечувальними синоптичними зв'язками. Єдиний синапс з позитивним оберненим зв'язком для кожного нейрону поєднані з його ж аксоном[5,6].

Ідея роботи мережі складається в находженні відстані Хеммінга від тестованого образу до всіх зразків. Відстанню Хеммінга називається число відрізняючих бітів в двох бінарних векторах. Мережа повинна вибрати зразок з мінімальною відстанню Хеммінга до невідомого вхідного сигналу, у результаті чого буде активізовано тільки один вихід мережі, що відповідає цьому зразку [7]. Іншими словами НМ по вхідному вектору X вибере (спрогнозує) рівні «ризику» і дасть пропозицію по виробці УР у вигляді вихідного вектору

На основі вектору X, рекомендацій експертів по БП і статистичної інформації вибираються вагові коефіцієнти синоптичного зв'язку першого слою *Wj* :

$$w_{ik} = \frac{x_i^k}{2}, i = 0...n-1, k = 0...m-1., \quad (8)$$

де $x_i^k$ — *i*-ий елемент *A*-ого образу. Активаційна функція має вигляд порогу.

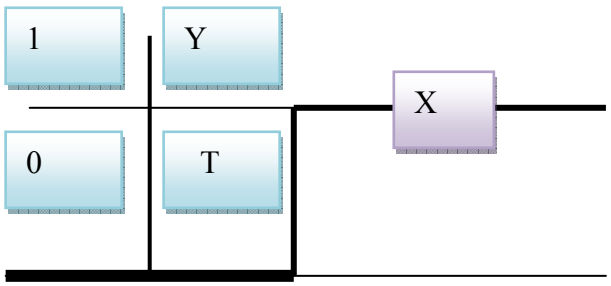



Рис. 2. Активаційна функція

З малюнку функції одиничного стрибка видно, що порогове значення T, в загальному випадку, може приймати вільне значення. Більш того, воно повинно приймати таке вільне, невідоме завчасно значення, яке підбирається на ступені навчання разом з ваговими коефіцієнтами.

## Висновки

Розроблена нейронно-мережева модель управління БП дозволить ефективно вирішити задачу синтезу виникнення ризику авіаційних подій та видати вектор управляючих сигналів мережі по неповної та спотвореної інформації о явищах, подіях та процесах, які мають вплив на БП.

Необхідно лише здійснити перелік факторів які впливають на прогнозну величину, та здійснити підбір достатнього числа прикладів які описують поведінку цих величин в минулому. НМ сама „настроїться" на задану сукупність прикладів, зводячи до мінімуму сумарну помилку прогнозування. Аналіз настроєної НМ дозволяє знаходити скриті залежності між вхідними і вихідними даними, що не можливо зробити традиційними методами.

Передбачаючи, що характер взаємозв'язку між заданими параметрами ще деякий час не зміниться, експерт може використовувати настроєну та навчену НМ для короткочасного/довгочасного прогнозування та напрацювання УР.

## Список літератури


1. *Боровиков В.П.* Нейронные сети. Statistica Neural Networks: Методология и технологии современного анализа даннях / В.П. Боровиков, А.Н. Борисов. Киев, 2008. – 392с

2. *Горбань А.Н.* Обобщенная аппроксимационная теорема и вычислительные возможности нейронных сетей / А.Н. Горбань // РАН. Сибирское отделение. - Новосибирск, 1998. - Т.1, №1. - С.11-24.

3. *Поспелов Г.С.* Исскуственный интеллект – основа новой информационной технологии / Г.С. Поспелов М.: Наука, 1998 – 280с.

4. *Тарасенко Р.А.* Метод анализа и повышения качества обучающих выборок нейронных сетей для прогнозирования временных рядов. / Р.А. Тарасенко // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук - ОНПУ - 2002.

5. *Харченко В.П.* Інтеграція засобів діагностики, прогнозування і управління рівнем безпеки польотів / А.Е. Луппо, О.Н. Алексеев Київ, Вісник НАУ №2 (32) 2007. С 43-49.

6. *Харченко В.П.* Некоторые аспекты установления системы менеджмента безопасности в гражданской авиации Украины / В.П. Харченко, А.Е Луппо, О.Н. Алексеев– Проблеми інформатизації та управління, збірник наукових праць. Вип. 1(19), К.: - 2007. -148-153с.

7. *Kharchenko V.P.* Some aspect automation safety flight system in civil aviation of Ukraine / V.P. Kharchenko, O.N. Alexeiev – Proceedings of the third world congress "Aviation in the XXI – st century". 2008 – 31.22 – 31.25.

8. Artificial Neural Networks: Concept & Theory, IEEE Computer Society Press. 1992 – p 249

УДК: 629.735.051 (043.2)

*С.І. Ільницька*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# АНАЛІЗ СХЕМ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНИХ ІНЕРЦІАЛЬНО-СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ

*Проаналізовані схеми інтеграції інерціально-супутникових систем навігації, приведені основні схеми побудови, розглянуто основні переваги та недоліки впровадження кожної з приведених схем.*

**Вступ**. Інтеграція супутникової системи навігації (СНС) та інерціальної системи навігації (ІНС) є далеко не новою концепцією [2], проте до цих пір залишається нагальною потребою, оскільки постійною метою є покращення точності навігаційних рішень, підвищення завадостійкості, надійності систем. Завдяки різним фізичній природі, характеристикам похибок, вимірюваним сигналам, ІНС і СНС добре доповнюють одна одну. Їхнє спільне використання дозволяє, з одного боку, обмежити зростання похибок ІНС а, з іншого боку, знизити шумову складову похибок СНС, підвищити темп видачі інформації бортовим споживачам, істотно підняти рівень завадостійкості.

**Класифікація та схеми побудови інтегрованих інерціально-супутникових систем навігації.** В теперішній час розроблені схеми можливої інтеграції СНС і ІНС у чотирьох основних варіантах [1,3]:

- роздільна схема;
- слабко зв'язана схема;
- жорстко зв'язана схема;
- глибоко інтегрована схема.

**Роздільна або розімкнута схема**. Це найпростіший варіант сумісного використання обох систем (рис.1). Тут обидва навігаційні рішення існують окремо, будучи інтегрованими лише подумки. Проте оскільки похибки в ІНС із часом зростають, то необхідно з певною періодичністю проводити корекцію за даними СНС. Така архітектура забезпечує незалежність систем (крім моментів перезапуску або корекції) та надмірність навігаційної інформації.

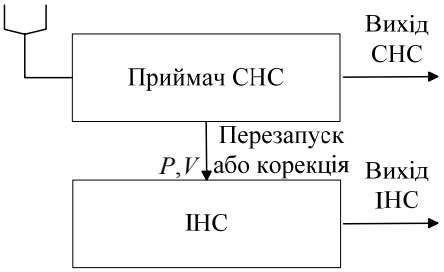



Рис. 1 Роздільна схема

**Слабко зв’язана система – Консервативний підхід.** На рис.2 показано один із варіантів слабко зв’язаної системи. В цій схемі функціональний розподіл підсистем може супроводжуватись також їх фізичним поділом: приймач СНС, ІНС і навігаційний обчислювач оформляються у вигляді закінчених роздільних блоків, між якими організовуються інформаційні зв'язки, які, як правило, працюють на невисоких швидкостях передачі даних. При бажанні усі три перелічені компоненти системи можна розмістити у єдиному модулі.

На рис.2 видно, що сигнали несучої частоти, модульовані за амплітудою псевдовипадкового сигналу, отримуються на вхідному каскаді приймача. Вони перетворюються, понижаючи частоту, і подаються на корелятори. В цей час всередині приймача генеруються дублікати сигналу (три або більше). Одна із цих копій синхронізується за часом таким чином, що миттєво приходить до корелятора точно у той же час, що й сигнал від антени. Інші копії навмисне або трохи раніше, або трохи пізніше порівнюються із тим, що очікується від супутника. Ці

копії посилаються на ранні та пізні корелятори. Амплітуда ранніх та пізніх кореляцій, що позначена [+,-] на рисунку, передається у контури стеження. Різниця цих амплітуд є показанням часової похибки (і відповідно, похибки по дальності). Цей сигнал похибки назад подається до кодового генератору, який проводить корекцію синхронізації часового зсуву коду. Цей процес повторюється до тих пір, поки присутній сигнал. У якийсь момент фазова похибка буде приведена до допустимого рівня і код (сигнал) супутника буде вважатись «захопленим». У стані «захоплення» різниця у часі між передачею та отриманням сигналу є вимірюванням псевдо віддалі до супутника.

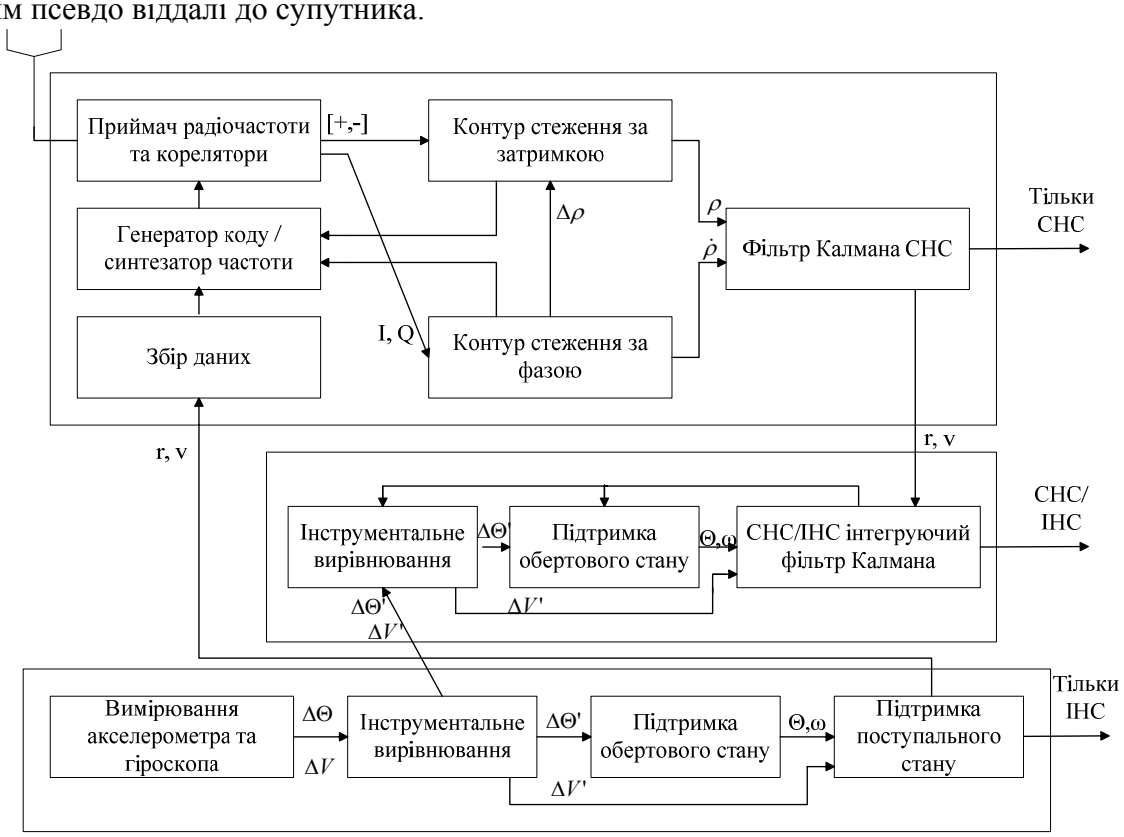



Рис. 2 Слабко зв'язана система – Консервативний підхід

Аналогічно синфазні та квадратурні сигнали подаються до несучого слідкуючого контуру. Арктангенс цих двох сигналів є мірою похибки стеження за фазою несучої частоти. Цей сигнал назад подається до частотного генератора, і його частота відповідно налаштовується. Потрібно відмітити, що контур стеження за фазою несучої частоти (КСФ) звичайно має 3-й порядок, що дозволяє «ідеально стежити» за сигналами з постійним діапазоном прискорень. Також контур стеження за фазою несучої частоти, коли знаходиться у стані «захоплення» сигналу, подає коригувальний сигнал у контур стеження за затримкою (КСЗ), що показано маркованою стрілкою $\Delta\rho$. В такому режимі КСЗ може бути першого порядку.

У такій архітектурі приймач СНС використовує дані від ІНС лише з ціллю допомоги у зборі даних. Знання положення та швидкості транспортного засобу дозволяє кодовому генератору та осцилятору робити хороші початкові вгадування частоти та фази вхідного сигналу. Час пошуку під час збору даних може бути значно зменшений в залежності від точності цих оцінок.

Вихід слідкуючих систем це оцінка дальності та швидкості між супутником та приймачем. Оцінок дальності та швидкості від чотирьох супутників достатньо для того, щоб знайти положення транспортного засобу, його швидкість, зсув у часі та швидкість дрейфу часової складової годинника приймача. Для деяких приймачів ці числа, що визначаються раз на секунду, є кінцевим виходом приймача. Однак приймачі, які очікується використовувати у динамічному середовищі, використовують «поліноміальний» фільтр Калмана для оцінки поло-

ження, швидкості та прискорення, і зсуву у часі та швидкості дрейфу часової складової годинника приймача.

У блоці ІНС на рис.2 показана структура безплатформної інерціальної системи навігації. Первинні вимірювання від акселерометрів та гіроскопів вирівнюються, використовуючи апріорні величини, або величини, отримані з іншого режиму роботи (наприклад, режиму калібрування і підстроювання). Вихід гіроскопу використовується, щоб зберігати обертальний стан транспортного засобу. Кутові швидкості інтегруються або в кватерніон, або у матрицю, яка пов'язує орієнтацію транспортного засобу з деякою референтною системою відліку (локального рівня). Скориговані $\Delta V'$ обертаються у цій системі координат та інтегруються, щоб зберегти поступальний стан, положення та швидкість.

У середній частині рис.2 зображено з'єднувальний блок, що виконує інтеграційну функцію ІНС та СНС. Він отримує відкориговані інерційні вимірювання, $\Delta\Theta'$ та $\Delta V'$ від ІНС та вимірювання положення та швидкості від СНС приймача. СНС вимірювання на частоті 1Гц, що виходять з фільтру Калмана, високо корельовані. Другий фільтр Калмана у такій «каскадній» архітектурі вирішує цю проблему, об'єднуючи ці вимірювання кожні 10 с. Інтервал у 10 секунд дозволяє кожному вимірюванню положення/швидкість бути більш-менш незалежному від попередніх вимірювань. Потрібно також відмітити, що інтегруючий фільтр Калмана включає калібрування і підстроювання оцінок, що забезпечує моментальне покращення калібрування та підстроювання ІНС.

У таблиці 1 підсумовано функції трьох перерахованих вище компонентів системи.

Таблиця 1. Функції компонент слабко зв'язаної системи.

| **Компонента** | **Функції** |
|---|---|
| СНС | Фільтр Калмана дає оцінки: положення, швидкості, прискорення, зсуву у часі та швидкості дрейфу часової складової годинника приймача. |
| ІНС | ІНС забезпечує даними про: положення, швидкість, прискорення, орієнтацію, кутові швидкості |
| Інтегруючий фільтр | Інтегруючий фільтр дає оцінки: положення, швидкості, корекції орієнтації, інструментальної корекції |

**Слабко зв'язана система – фундаментальний підхід (aggressive approach)**

Рис. 3 представляє із себе можливу варіацію, яка все ще може розглядатись як система із слабко зв'язаною архітектурою. Корекція від інерціальних систем до слідкуючих систем не включена, а інтеграційний фільтр все ще використовує дані про положення та швидкість, а не псевдо віддаль та псевдо швидкість. Додаткові передачі даних, яких не було на попередній схемі, показані потовщеними лініями. Обидві вони є життєздатними альтернативами.

Перша із цієї передачі даних є приростом відкоригованої швидкості $\Delta V'$ з модуля СНС/ІНС, що використовується у модулі СНС для розповсюдження навігаційного рішення між вимірюваннями. Це забезпечує значне покращення в динамічних ситуаціях. В іншому випадку розповсюдження повинно було б бути зроблене, використовуючи оцінку прискорення від самого фільтру Калмана СНС. Це прискорення, хоча і є компонентом фільтру стану, може отримуватись зворотнім диференціюванням швидкості.

Інша альтернативна передача даних відповідає за калібрування у польоті та корекції підстроювання від СНС/ІНС оцінювача до ІНС. Це допомагає утримувати ІНС в більшій узгодженості з СНС/ІНС навігаційним рішенням. Звичайно, що автономність обох систем при цьому втрачається.

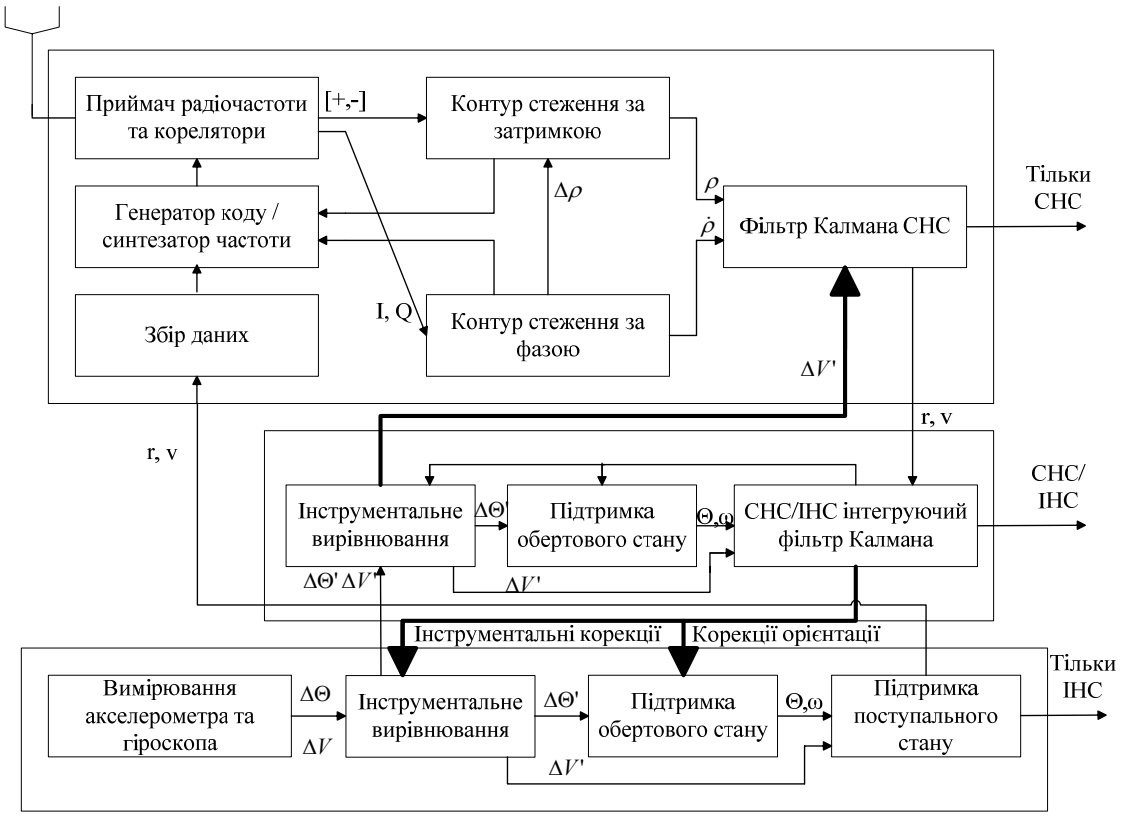



Рис. 3 Слабко зв'язана система - Фундаментальний підхід

Таким чином, навігаційна точність комбінованих СНС та ІНС покращилась за рахунок втрати автономності їх індивідуальних рішень. Також збереглись надлишкові системи.

**Підхід до слабко зв'язаних систем за MAGR-схемою (Military Airborne GPS Receiver) фірми Rockwell**

Цей підхід може бути охарактеризований як щось середнє між слабко та жорстко зв'язаними системами. На рис. 4 показано функції СНС, ІНС та відповідні інтерфейси між ними. MAGR має два режими роботи: режим ІНС та режим ПШП (положення, швидкість і прискорення). Останній є самостійним режимом, незалежним від інерційних вимірювань.




Рис. 4 Слабко зв'язана система за MAGR-схемою

У режимі ІНС інерціальні вимірювання використовуються у контурі стеження за кодом СНС-приймача при провалі „захоплення” у контурі стеження за несучою частотою. СНС використовує інерціальні вимірювання більше для екстраполяції даних про положення та швидкість між СНС вимірюваннями, ніж для оцінювання прискорення у поліноміальному фільтрі. СНС оцінює корекції орієнтації для інерціального вимірювального блоку. Таким чином, MAGR у режимі ІНС має деякі ознаки жорстко зв’язаних систем. У таблиці 2 показані елементи станів фільтру для обох режимів роботи схеми.

**Таблиця 2 Стани фільтру для MAGR-схеми**

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Режим ПШП** | Положення | Швидкість | Прискорення | Зсув часу | Дрейф часової складової | Зсув барометричних вимірювань |
| **Режим ІНС** | Положення | Швидкість | Корекції орієнтації | Зсув часу | Дрейф часової складової | Зсув барометра барометричних вимірювань |

**Жорстко зв'язані схеми.** Третім варіантом інтеграції систем є жорстко зв’язана система. У таких системах ступінь автономності ІНС зазвичай значно менший, ніж у слабко зв’язаних системах. Практично ІНС є частіше придатком до СНС. Розглянемо дві можливі варіації таких систем. СНС дальність та дельта дальність (delta range) прямо об’єднуються у навігаційну оцінку, а дані про положення та швидкість від інерціальної системи використовуються СНС приймачем з ціллю зменшення ширини полоси пропускання у слідкуючій системі навіть за присутності високої динаміки. Першою розглянемо систему, яка забезпечує об’єднане СНС/ІНС рішення, а потім систему, яка зберігає незалежні та надлишкові СНС та ІНС рішення.

**Жорстко зв'язана схема – об’єднане СНС/ІНС рішення**

На рис.5 показана архітектура жорстко зв’язаної СНС/ІНС навігаційної системи, яка пропонує єдине навігаційне рішення. ІНС та СНС модулі були дещо обрізані. Інерціальна «система» тепер просто забезпечує «сирі вимірювання». СНС приймач не має власного фільтру Калмана, проте все ще має незалежні слідкуючі системи, які забезпечують даними про псевдо дальність та псевдо швидкість. Хоча цього не показано на рисунках, проте зрозуміло, що для визначення положення та швидкості необхідні данні про псевдо дальність та псевдо швидкість як мінімум від чотирьох супутників. СНС функції, показані у верхній частині рисунку, дублюються для кожного супутника або за допомогою роботи з діленням часу (time sharing), або, як це більш поширено сьогодні, за допомогою виділення багатьох «каналів» у приймачеві – лише один з яких показано на рисунку.

Слідкуючі контури у приймачеві коригуються даними від СНС/ІНС оцінювача станів. Потрібно, щоб ці дані були на високих швидкостях, тому розповсюдження від однієї ітерації вимірювання до іншої розбивається на багато підінтервалів з ціллю корекції контурів стеження. Це потрібно для того, щоб подавати у контур стеження інформацію навіть тоді, коли сигнал приймача або відсутній, або подавлений завадами. Величини, що оцінюються за допомогою фільтру Калмана, - це положення та швидкість, в той час як дані, які потрібні слідкуючим системам, - це часовий зсув коду (code phase / range) та зсув допплерівської частоти (Doppler frequency shift / range rate). Щоб обрахувати часовий зсув коду та зсув частоти, використовуються оцінені положення та швидкість разом з ефемеридами супутників. Блок-схема показує передачу r, v, і часовий зсув (delta range) та зсув частоти (range rate), маючи на увазі, що ці обрахунки виконуються приймачем. Також вони могли б бути виконані у блоці «ОЦІНЮВАЧ СТАНУ». Ширина полоси пропускання слідкуючих систем повинна вміщувати лише помилки виміряного прискорення, а не саме прискорення. Ці помилки на багато порядків менші за амплітудою ніж саме прискорення, що також залежить від якості інерціальної системи та її калібрування.

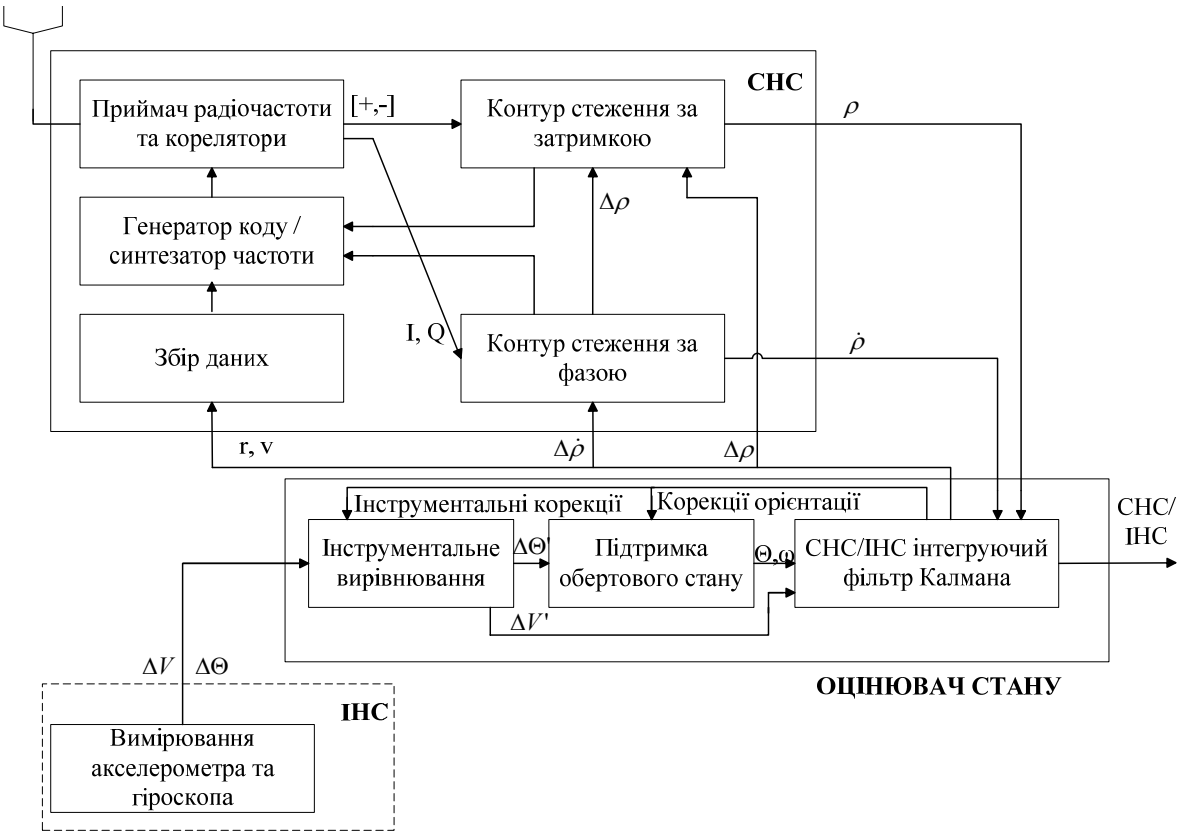



Рис. 5. Жорстко зв'язана схема – об’єднане СНС/ІНС рішення

Жорстко зв’язані навігаційні системи більш точні, також в них все ще присутні переваги та атрибути слабко зв’язаних систем, окрім втрати надлишковості. Ширина полоси пропускання слідкуючої системи можу бути зменшена, що таким чином підвищує завадостійкість. Інтегруючий фільтр може оптимально використовувати дані від усіх супутників, що відстежуються, навіть якщо їх менше чотирьох. Потрібно відмітити, що окреме рішення СНС може зберігатись з двома або трьома супутниками, якщо зробити або одне з двох, або обидва припущення: 1) зсув часу годинника приймача постійний, 2) висота є постійною, або відомою з інших джерел (наприклад, барометричний висотомір). Для запропонованої схеми втрачається лише надлишковість, що забезпечувалась трьома повними системами.

**Жорстко зв'язана схема з надлишковими рішеннями**

На рис. 6 показано жорстко зв’язану схему, яка також пропонує надлишкові навігаційні рішення від обох систем – СНС та ІНС. Ця схема дуже схожа на архітектуру слабко зв’язаної системи. Доповненням є «інерціальна» корекція слідкуючих систем від СНС/ІНС рішення та вимірювань псевдо дальності і псевдо швидкості від приймача до інтегруючого фільтру.

Ця покращена система вимагає більш досконалого програмного забезпечення. Це є ціною надлишковості, якщо тільки програмне забезпечення уже не присутнє в СНС та ІНС.

Жорстко зв’язаний приймач пропонує підвищену завадостійкість. Він може продовжувати роботу, коли сигнал від СНС є переривчатим через перекривання різноманітними природними та штучними перешкодами.

**Глибока інтеграція.** Так звані глибоко інтегровані системи є ще більш складними і менш гнучкими з огляду організації їхньої структури, мають жорстку організацію зв'язків і єдиний вихід. На рис. 7 показана архітектура глибоко інтегрованої СНС/ІНС навігаційної системи. У даній схемі концепція окремих слідкуючих систем для стеження за затримкою та фазою несучої частоти була усунена.

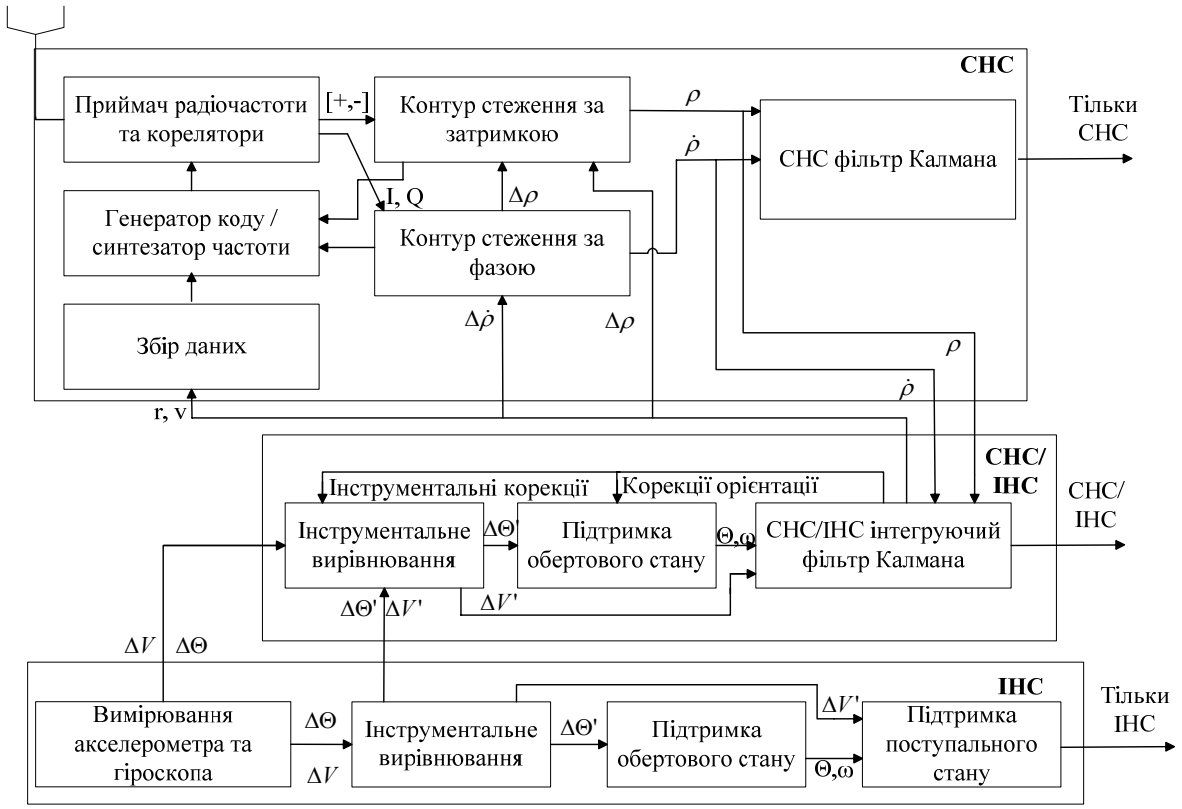



Рис.6 Жорстко зв'язана схема з надлишковими рішеннями

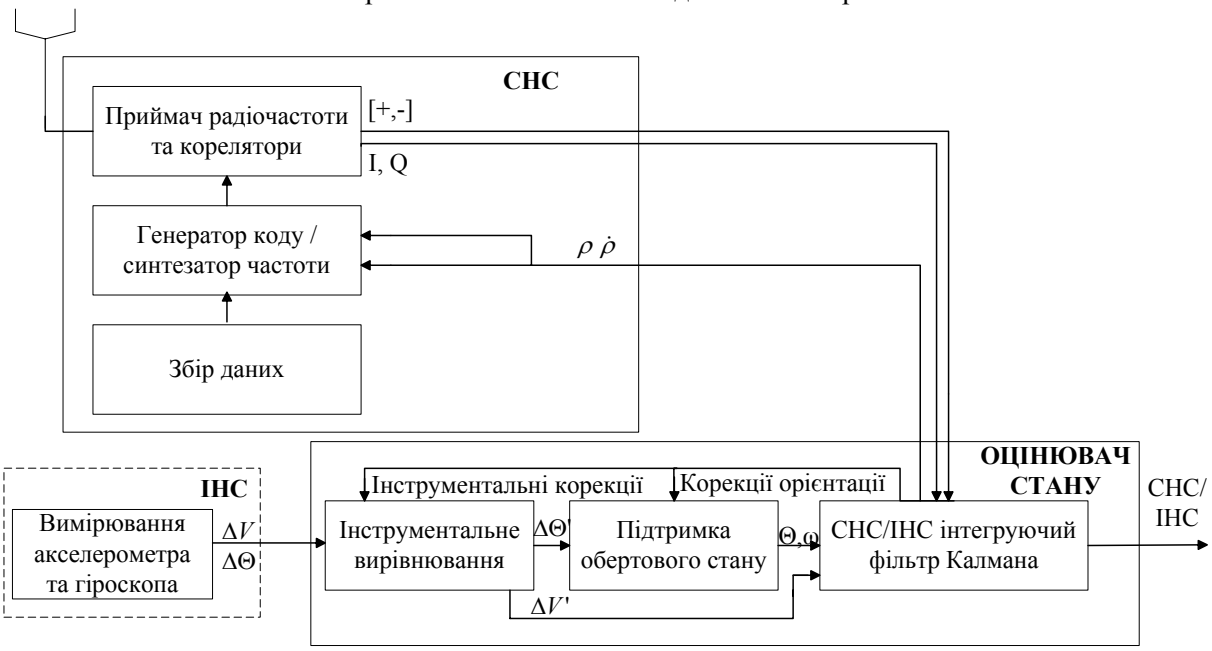



Рис. 7 Структура глибоко інтегрованої системи

Усі відмінені операції тепер виконуються у фільтрі Калмана, включаючи оцінку псевдо дальності та псевдо швидкості. Ця архітектура знімає питання каскадних фільтрів і нестабільних оцінок псевдо дальності та псевдо швидкості. Величини пізньої та ранньої кореляції, синфазні та квадратурні сигнали (або еквівалентна інформація) є входами фільтру Калмана, який використовується для обрахунку оцінок виміряних величин. Різниця між виміряною та оціненою величиною є зваженою, що залежить від оберненої дисперсії (inverse of the variance) виміряної та оціненої величин. Після об'єднання вимірювань покращені дані про псевдо дальність та псевдо швидкість посилаються на кодовий та частотний генератори, і тоді виконується наступне вимірювання.

Звичайно виникає питання про пропускну здатність комп'ютера, яка необхідна для впрова-

дження навігаційного фільтру 20-40-го порядку на високій швидкості. Відмітимо, що дані акселерометра можуть бути використані для керування частотним генератором. Це дозволить визначити часи інтеграцій довгих когерентних сигналів, проводити більш точні вимірювання на нижчих швидкостях.

**Висновки**. Таким чином, як показує аналіз вищерозглянутих систем, достоїнства кожного наступного рівня інтеграції також включають переваги попереднього рівня (винятком є втрата надлишковості і незалежності для жорстко зв'язаних систем із простішою архітектурою). В табл. 3 підсумовані основні особливості перелічених схем комплексних систем [1].

Таблиця 3

| Тип системи | Основні якості |
|---|---|
| Роздільна | Надмірність, обмеженість похибок оцінок місця розташування і швидкості, наявність інформації про орієнтацію і кутову швидкість, висока швидкість видачі інформації, мінімальні зміни в бортовій апаратурі |
| Слабко зв'язана | Усі перераховані якості роздільних систем, плюс більш швидке відновлення стеження за кодом і фазою сигналів СНС, виставка та калібрування БІНС у польоті, як наслідок – підвищена точність під час відсутності сигналу СНС або за умов його навмисного глушіння |
| Жорстко зв'язана | Подальше поліпшення точності і калібрування, підвищена стійкість стеження за сигналами СНС при маневрах ЛА, підвищена завадостійкість, оптимальне використання супутників будь-якої кількості |
| Глибоко інтегрована | Достоїнства: єдиний фільтр усуває проблему „каскадного" включення фільтрів, компактність, знижені вимоги з енергозабезпечення. Недоліки: вектор стану містить до 40 компонентів, тому фільтр складно реалізувати; необхідність розробки спеціальних датчиків |

Загальна тенденція розвитку інтегрованих систем така, що під впливом усе більш жорстких вимог розробники інтегрованих систем навігації рухаються за шляхом поглиблення інтеграції між СНС і ІНС [7,8], незважаючи на складнощі реалізації таких систем. Особливим стимулом для цього останнім часом стала розробка інерціальних датчиків низької вартості та бурхливий розвиток обчислювальної техніки, тому розвиток жорстко та глибоко інтегрованих систем стає найбільш перспективним та цікавим [4,5,6].

## Список літератури


1. *Філяшкін М.К., Рогожин В.О., Скрипець А.В., Лукінова Т.І.* Інерціально-супутниковінавігаційні системи - К.: Вид-во НАУ, 2005. – 104 с.
2. Cox, D.B. "Inertial integration of GPS", Global Position System – Papers published in navigation, Vol.1, Institute of Navigation, Alexandria, VA., 1980
3. *Richard, E.Ph, George T.Sch,* The Charles Stark Draper Laboratory. Cambridge. "GPS/INS Integration" – Paper presented at the AGARD MSP Lecture Series on "System implication and Innovative Applications of Satellite Navigation", 1966.
4. Salychev, O.S., V.V. Voronov, M.E. Cannon, R. Nayak and G. Lachapelle (2000). Low Cost INS/GPS Integration: Concepts and Testing. Proceedings of the National Technical Meeting 1994, The Institute of Navigation, Alexandria, VA., pp. 98-105.
5. Schwarz, K.P. and G. Zhang (1994). Development and Testing of a Low Cost Integrated GPS/INS. Proceedings of GPS-1994, The Institute of Navigation, Alexandria, VA., pp. 1137-1144.
6. Wirola, L. and Alanen, K. and Kappi, J. and Syrjarinne, J. (2006) Bringing RTK to Cellular Terminals Using a Low-Cost Single-Frequency AGPS Receiver and Inertial Sensors. In Proceedings of IEEE/ION PLANS 2006, 25th-27th April, San Diego, CA, USA, pages 645–652.
7. Сайт американської компанії Rockwell Collins // http://www.rockwellcollins.com
8. Сайт американської компанії Applanix http://www.applanix.com

УДК 621.396.96

*Ю.А. Авер'янова, к.т.н., А.А. Аверьянов, к.т.н.*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ПОЛЯРИМЕТРІЇ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ДЛЯ АВІАЦІЇ АТМОСФЕРНИХ ЯВИЩ

*Зроблено огляд та проаналізовані існуючі та перспективні поляриметричні методи та підходи щодо одержання інформації про небезпечні для авіації атмосферні явища. В результаті аналізу відокремлені важливі питання, які необхідно вирішити для успішного впровадження поляриметричних методів для дослідження атмосферних процесів та явищ. Особливу увагу приділяється можливості використання поляриметричних методів для одержання інформації про динамічні процеси в атмосфері.*

Використання мікрохвильових технологій для дистанційного одержання даних про стан атмосфери, явища та процеси в ній значно підвищують сучасний рівень забезпеченості метеорологічною інформацією різні структури, що працюють у сферах авіації, метеорології, транспорту, зв'язку, навігації, кліматології, гідрології, сільського господарства тощо.

Для оперативного забезпечення авіації інформацією про небезпечні атмосферні явища та процеси у світі широко використовується мережа як наземних, так і бортових радіолокаційних станцій. В Україні та багатьох інших державах це переважно звичайні метеорологічні радіолокатори, які дозволяють одержати інформацію за рівнем потужності відбитого від метеоутворень радіолокаційного сигналу. USA та деякі інші держави використовують мережу допплерівських радіолокаторів (таких як WSR-88D). Відомо, що порівняно з звичайними метеорологічними радіолокаторами, допплерівські когерентні системи дозволяють одержати інформацію і про динамічні процеси в атмосфері.

За останій час в деяких державах, таких як USA, Великобританія, Нідерланди, Україна тощо проводились дослідження стосовно можливості використання комбінованого, так званого допплерівсько-поляриметричного підходу для дослідження атмосфери. В USA навіть реалізується програма модернізації мережі допплерівських радіолокаторів та надання їм додаткових можливостей враховувати поляризаційні характеристики відбитих від метеоутворень електромагнітних хвиль [1]. Результати багатьох експериментів, наприклад [2,3,4], показали, що допплерівсько-поляриметричний підхід дозволяє підвищити інформативність вимірювальних параметрів та є більш ефективним при локалізації небезпечних для авіації атмосферних явищ, хоча і ускладнюються питання пов'язані з обробкою інформації та інтерпретацією даних.

Використання поляриметричних методів для дослідження атмосфери базується на тому факті, що поляризаційні характеристики є чутливими до форми та орієнтації часточок [5,6]. Отже поляриметричні радіолокаційні системи вимірюють характеристики зворотного розсіяння, що залежать від поляризації. Поляризаційні характеристики відбитих сигналів часто описують за допомогою матриці зворотного розсіяння (1):

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}^{зв} = \begin{bmatrix} S_{hh} S_{hv} \\ S_{vh} S_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}^{n} \frac{e^{-jKr}}{r}, \qquad (1)$$

*S* з різними індексами – комплексні амплітуди відбитого електромагнітного поля;
*E* – відбите електромагнітне поле;
індекси 1 та 2 відповідають двом ортогональним поляризаціям (наприклад лінійним горизонтальній та вертикальній);
$k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число.

Використання такої матриці дозволяє ввести набор поляризаційних параметрів радіолокаційного сигналу, які можна виміряти та зв'язати їх з властивостями розсіювачів і фізичними процесами в атмосфері. Щодо властивостей розсіювачів, у нашому випадку гідро мете-

орів, то це може бути еквівалентний діаметр, форма та орієнтація гідрометеорів. Відомо, що різним типам опадів та хмар відповідають різні складові таких метеоутворень. В більшості ці складові є частинками несферичної форми. Чим більший розмір мають краплі дощу, тим більш сплющеними вони є; кристали льоду можуть бути витягнутими, або також сплющеними; сніжинки мають досить складну форму. Змінюючи поляризаційні характеристики радіолокаційних антен можна дістати інформацію щодо форми гідрометеорів та визначити тип гідрометеорів. На наш час використання поляризаційних характеристик при мікрохвильовому дистанційному зондуванні атмосфери розглядається переважно як надання існуючим метеорологічним радіолокаційним системам можливості поліпшення якості ідентифікації типу гідрометеорів і точності оцінки інтенсивності опадів.

В роботах [7,8] показана можливість використання поляриметричних методів для виявлення атмосферних явищ, що пов‘язані з вітром, у випадку рідких гідрометеорів. Краплі під дією атмосферних явищ, пов‘язаних з вітром, можуть змінювати свою форму та просторову орієнтацію. Як було зазначено вище форма та орієнтація гідрометеорів є властивостями рідких часточок, які можна зв‘язати з вимірювальними поляризаційними параметрами радіолокаційного сигналу. Таким чином, характер та величина зміни кута поляризації відбитого від метеорологічного об’єкту сигналу можуть розглядатися як інформативні параметри, які відображають ступінь дії вітрових явищ на гідрометеори, що дозволяє одержати більш детальну інформацію про фізику явищ.

На наш час найчастіше використовуються поляриметричні радіолокатори, які налаштовані приймати відбиті від метеорологічних цілей електромагнітні хвилі основної поляризації – поляризації зондувальної електромагнітної хвилі та хвилі з поляризацією, що є ортогональною до поляризації зондувального випромінювання. Тобто використовуються системи з 2 антенами, що налаштовані приймати електромагнітні хвилі з основною, та ортогональною поляризаціями, або системи з можливістю послідовного перемикання поляризації. Рівень відбитого сигналу в антені, яка налаштована приймати електромагнітні хвилі з ортогональною поляризацією, найчастіше є дуже невеликим для його подальшої ефективної обробки та розрахунку поляриметричних параметрів на достатньому рівні ймовірності для виявлення небезпечних для авіації явищ. Для подальшого успішного розвитку поляриметричного підходу для дистанційного зондування атмосфери треба вирішувати низку питань, пов‘язаних з

- розробкою математичних моделей, що мають враховувати властивості радіолокаційної системи та динаміку метеорологічного об‘єкту, а також зв‘язок поляриметричних параметрів електромагнітної хвилі з станом об‘єкту, що досліджується;
- розробкою алгоритмів оцінки поляриметричних параметрів та алгоритмів обробки прийнятої інформації; розробки алгоритмів виявлення небезпечних для авіації атмосферних явищ та використання цієї інформації для підвищення рівня безпеки польотів;
- розробкою методів підвищення інформативності зондувальних систем шляхом комбінації поляриметричних методів з існуючими звичайними та допплерівськими системами, а також з можливим використанням різних каналів для різних частотних діапазонів, наприклад лазерних, звукових тощо;
- підвищенням оперативності зондувальних систем при одержанні інформації про небезпечні для авіації динамічні атмосферні явища.

В роботах [9,10] запропоновано та розглянуто поляриметричний радіолокатор, що має декілька приймальних антен налаштованих на приймання електромагнітних хвиль з різними поляризаціями, які спрямовані на один об‘єкт дослідження та кожна з яких з‘єднана з відповідним приймачем, виходи яких підключено до блоку обробки сигналів та визначення поляриметричних параметрів. Передавальна антенна такого поляриметричного радіолокатора налаштована на випромінювання електромагнітного коливання з фіксованою поляризацією. Підхід та пристрій, що запропоновано в [9,10] дозволяє оцінити інтенсивність небезпечних явищ, пов‘язаних з вітром за зміною складових поляризаційного спектру без додаткової обробки та розрахунків, що є дуже важливим для авіації з точки зору оперативності. Поняття

поляризаційного спектру введено авторами даної статті в роботах [11,12]. В роботі [13] проведено моделювання щодо енергетичної оцінки миттєвої потужності складових поляризаційного спектру. Загальним висновком запропонованого підходу оцінки динамічних атмосферних явищ за допомогою поляриметричного радіолокатору, що здатен приймати електромагнітні хвилі з основною поляризацією, та деякою поляризацією, що відрізняється як від основної, так і від ортогональної є те, що така система здатна забезпечити кращий рівень сигнал-шум, порівняно до рівня сигналу в антенні, що налаштована приймати хвилі з ортогональною поляризацією відповідно до зондувальної хвилі. Наслідком цього є можливість розраховувати поляриметричні параметри на кількісно вищому рівні ймовірності для виявлення небезпечних атмосферних явищ.

В роботі [14] показано можливість реалізації амплітудного поляриметричного підходу за допомогою радіолокаційної системи з одною антеною, яка послідовно передає та приймає електромагнітні хвилі однієї фіксованої поляризації. Підхід, що наведено в [14] дозволяє оцінити зміну поляризації відбитої від гідрометеорів електромагнітної хвилі за флуктуаціями амплітуди струму в антені.

При моделюванні процесів у згаданих поляриметричних підходах для визначення динамічних процесів в атмосфері детальна увага приділялась зміні характеристик, в тому числі частотних, відбивачів зондувальної хвилі під дією вітру та/або турбулентності.

## Висновки

З проведеного аналізу існуючих поляриметричних радіолокаційних засобів та можливостей оцінювати характеристики об‘єктів, що досліджуються за допомогою поляризаційних властивостей електромагнітних хвиль можна сказати, що використання таких методів у сучасних системах дистанційного зондування є перспективним та виправданим підходом для одержання інформації про атмосферні явища та процеси, що впливають на роботу авіації. Важливим є той факт, що для впровадження поляриметричних методів для зондування атмосфери не потребує повної заміни існуючих радіолокаційних систем, достатньо провести доробку сучасних засобів, в тому числі доплерівських радіолокаторів, стосовно можливості враховувати поляризаційні характеристики електромагнітних хвиль.

## Список літератури


1. *Zrnich D.* Weather Radar - Recent Developments and Trends: Proc. of 2nd Intern. Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS2008), 22-24 September, Kiev. - pp.173 – 178
2. *Yanovsky, F.J., L.P. Ligthart, and H.W.J. Russchenberg*. Analysis of Transportable Atmospheric Radar (TARA) possibilities for the remote sensing of dangerous meteorological phenomena. *PIERS Proceedings*, Cambridge, Massachusetts, USA, 1997, p.116.
3. *Yanovsky F.,* Studies on microstructure of clouds and precipitation, Report IRCTR-S-009-97, Delft University of Technology, September, 1997, 91pp.
4. *Yanovsky F.J, Unal C.M.H., Russchenberg W.J.* Doppler-Polarimetric Radar Observations of Turbulence in Rain. Report: IRCTR-S-006-03 (September 2002 – March 2003), TU-Delft, The Netherlands, 2003, 102.)
5. *Russchenberg, H.W.J.* Ground-based remote sensing of precipitation using a multi-polarized FM-CW Doppler radar - Delft University Press, 1992.- 206 p.
6. *Яновський Ф.* Бортові метеорологічні радіолокатори: Навч. посіб. - К.: НАУ, 2003. - 324 с.
7. *Averyanova Yu. A.* Use of Doppler-Polarimetric parameters for wind phenomena localization: EuRAD 2004, Proceedings of the 34th European microwave Conference, 11-15 October 2004, Amsterdam. The Netherlands.
8. Аверьянова Ю.А., Аверьянов А.А., Яновский Ф.И. Можливості використання поляриметричних радіолокаційних параметрів для визначення характеристик вітру: Вісник -К.: НАУ, 2005. Том 4- стр. 34-39
9. ПАТЕНТ на корисну модель Поляриметричний радіолокатор /*Авер‘янова Ю. А., Аверьянов А.О., Яновський Ф. Й.* - № u200804248; заявл. 04.04.2008; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.

10. *Averyanova Yu., Averyanov A., Yanovsky F.J.* Polarization signal components estimate in weather radar: Proc. of 12th Intern. Conf. on Mathematical methods in electromagnetic theory. – Odesa, 2008. - P. 360-362.
11. *Аверьянова Ю.А., Аверьянов А.А., Яновський Ф.Й.* Оцінка інтенсивності атмосферної турбулентності за допомогою поляриметричного радіолокатора: Вісник НАУ. - 2006. - № 2.- с. 38-40.
12. *Averyanova Yu.* The possibility to use polarimetric radar for atmospheric turbulence intensity estimate: Proc. of the National Aviation University. - 2006. № 3 (29). - P. 46-48.
13. *Averyanova Yu., Averyanov A.,Yanovsky F.J* The Estimate of Instantaneous Power of Polarization Spectrum Components in Polarmetric Weather Radar: Proc. of 2nd Intern. Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS2008), 22-24 September, Kiev. - P. 179-181.
14. *Averyanova Yu*., *Averyanov A.,Yanovsky F.J* Reflected Signal Depolarization Estimate with Single Transceiving Airborne Antenna: Proceedings of Signal Processing Symposium SPS-2009, 28-30 May 2009, Jachranka near Warsaw, Poland. (CD Publication).

УДК 629.7.07

*В.П. Харченко, д.т.н., Ю.В. Чинченко, к.т.н.*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ЕТАПИ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БЕЗПЕКОЮ ПОЛЬОТІВ

*Розглянуто питання створення систем керування безпекою польотів, що застосовуються для забезпечення комплексних превентивних заходів по зменшенню небезпек та ризиків у аеронавігаційній системі до нормативного рівня.*

На протязі всієї історії розвитку авіаційної транспортної системи безпека польотів була одним з визначних факторів діяльності. Це досить чітко відображено у цілях ІСАО в Чиказькій конвенції про відповідальність за забезпечення безпечного та впорядкованого розвитку міжнародної цивільної авіації [1-4].

**1. Процес керування безпекою**

У наш час актуальним є створення та вдосконалення системи керування безпекою (Safety Management System), яка являє собою впорядкований підхід до забезпечення безпеки польотів, що включає потрібні організаційні структури, сфери відповідальності, політику і процедури.

Така система керування безпекою має забезпечувати [2]:

- виявлення фактичної та потенційної загрози безпеці;
- гарантоване вживання коригувальних заходів, потрібних для зменшення факторів ризику (небезпеки);
- безперервний моніторинг і регулярну оцінку досягнутого рівня безпеки польотів.

Значна увага приділяється концепції керованого ризику, основу якої складають методи оцінювання ризиків, їх прогнозування та прийняття рішення. Можна виокремити такі етапи керування ризиками:

- планування, яке містить критерії прийнятного риску;
- ідентифікація безпеки;
- аналіз динамічної повітряної обстановки та виробничого середовища;
- порівняльне оцінювання безпеки;
- прийняття рішення.

Виходячи з вищевикладеного, ключовим елементом системи керування безпекою є методи оцінювання ризиків, тому питанням їх вдосконалення та розроблення нових методів і методик оцінювання ризиків потрібно приділяти велику увагу.

Схвалена державою СКБП чітко визначає сфери відповідальності, зокрема, пряму відповідальність керівництва за забезпечення безпеки польотів.

Для того щоб рівень ризику залишався прийнятним в умовах розширення діяльності авіації, сучасна практика керування безпекою польотів переходить від чистого реагування до проактивного методу. Варто зазначити, що цей підхід доповнює зобов’язання держав щодо дотримання стандартів та рекомендованої практики ІСАО і національних нормативних положень. Сучасний підхід керування безпекою польотів передбачає:

- застосування науково-обґрунтованих методів керування факторами ризику;
- корпоративну культуру безпеки, що сприяє застосуванню безпечної практики, заохочує надання інформації, що стосується безпеки польотів і активно впливає на керування безпекою польотів;
- ефективне дотримання стандартних експлуатаційних процедур, включаючи використання контрольних переліків та інструктажу;
- кваліфіковане розслідування авіаційних подій і серйозних інцидентів, спрямоване на виявлення системних недоліків у забезпеченні безпеки польотів, а не просто на пошук винних;

- забезпечення комплексної підготовки персоналу в сфері безпеки польотів, включаючи аспекти людського фактора;

- систематичні перевірки стану безпеки польотів і моніторинг результатів для проведення аналізу показників безпеки польотів і зменшення або усунення проблемних чинників.

Керування безпекою ґрунтується на фактичному матеріалі в тому розумінні, що для виявлення джерел небезпеки необхідно виконати аналіз даних. За допомогою методики оцінювання ризику встановлюються пріоритети, щоб зменшити потенційні наслідки небезпечних факторів.

Потім розробляються і реалізуються стратегії, покликані зменшити або ліквідувати зазначені фактори. Наведемо опис етапів процесу керування безпекою (рис. 1) [2].

1. Збір даних. Першим кроком у процесі керування безпекою є збір пов'язаних з безпекою даних – фактичного матеріалу, потрібного для визначення показників безпеки або виявлення прихованих небезпечних умов (небезпечних факторів). Зазначені дані можуть бути отримані з будь-якої частини системи, а саме: обладнання, експлуатаційного персоналу або робочих процедур.

2. Аналіз даних. Аналізуючи інформацію, можна виявити небезпечні фактори. Можливо також визначити умови, у яких зазначені фактори становлять реальну загрозу безпеці, їхні потенційні наслідки та імовірність виникнення події. Такий аналіз може мати як якісний, так і кількісний характер.

3. Ранжування небезпечних умов. За допомогою оцінки ризику визначається ступінь серйозності факторів небезпеки.

4. Розроблення стратегій. Починаючи з факторів ризику, що мають найвищий пріоритет, розглядаються всі варіанти контролю та керування цими факторами.

5. Затвердження стратегій. Після аналізу факторів ризику і вибору належного плану дій необхідно отримати згоду керівництва на його реалізацію. Проблема на цьому етапі полягає у формулюванні переконливих аргументів на користь здійснення змін.

6. Розподіл обов'язків і реалізація стратегій. Після рішення щодо продовження зазначених заходів необхідно розробити «практичні» аспекти реалізації плану. Вони включають питання виділення ресурсів, розподілу обов’язків, складання графіків та перегляду експлуатаційних правил.

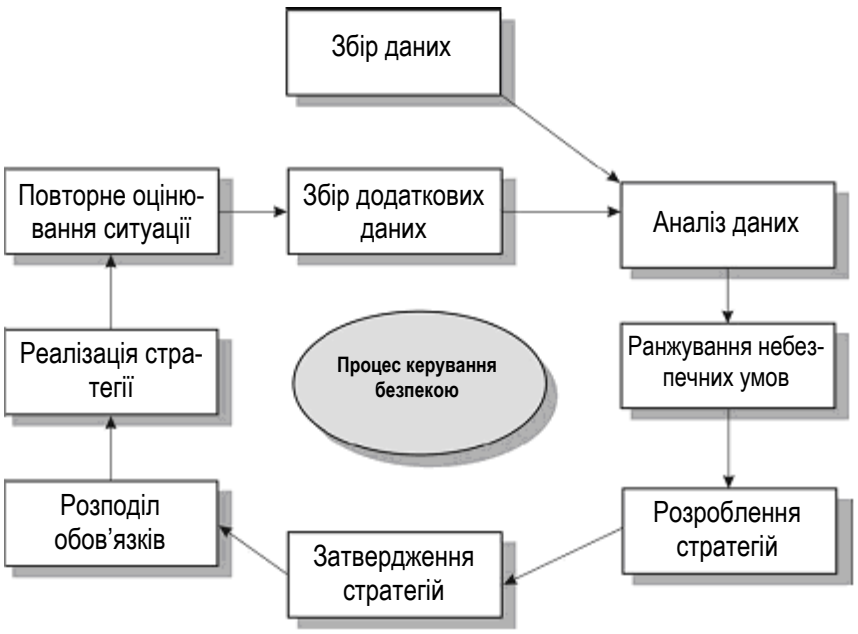



Рис. 1. Процес керування безпекою

7. Повторне оцінювання ситуації. Реалізація плану рідко виявляється настільки ж успішною, як передбачалося спочатку. Для отримання замкнутого контуру потрібен зворотний зв’язок.

8. Збір додаткових даних. Залежно від результатів повторної оцінки ситуації може виникнути потреба в додатковій інформації і повторенні повного циклу, щоб отримати більш високу ефективність вжитих заходів безпеки.

**2. Методологія оцінювання ризику**

Розгляд безпеки має включати концепцію ризику, зважаючи на те, що безпека безпосередньо виражається через ризик. Оцінюючи прийнятність ризику, пов’язаного з певною небезпекою, необхідно враховувати як імовірність небезпечного випадку, так і ступінь серйозності потенційних наслідків.

Дані щодо рівня ризику можна класифікувати за такими ознаками [2,5]:

- неприйнятні рівні ризику (можливі події достатньо небезпечні, тому потребують додаткових дій для їх усунення);
- прийнятні рівні ризику (можливі події незначною мірою впливають на безпеку);
- рівні ризику, що перебувають між першими двома категоріями (потрібно оцінити компроміс між ступенем ризику й економічними вигодами).

У всіх випадках, коли фактор ризику не задовольняє встановлені критерії, необхідно знизити його до прийнятного рівня, використовуючи наявні методи зменшення ризику.

Наведені положення графічно ілюструються у вигляді трикутника «допустимості ризику» (рис. 2) [2].

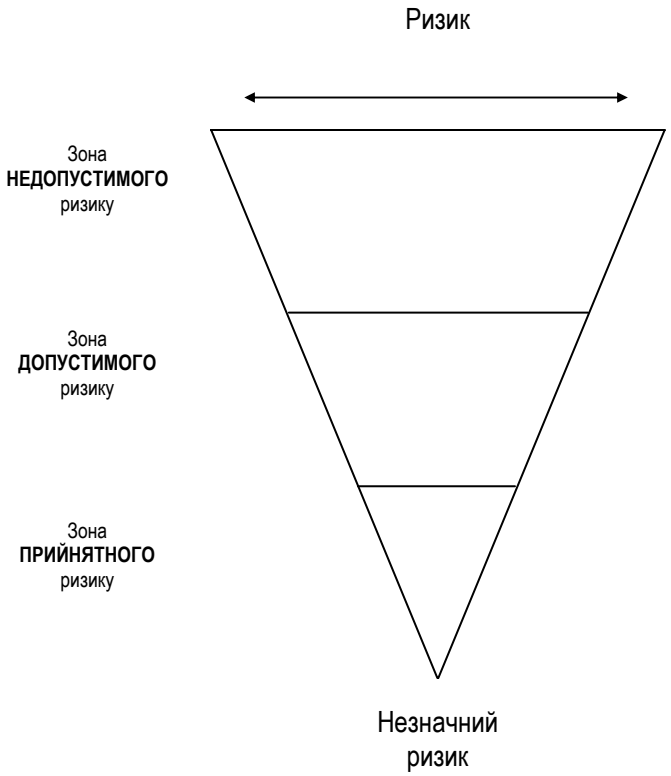



Рис. 2. Трикутник допустимості ризику

Через порівняння ймовірності несприятливого результату з потенційним ступенем значущості цього результату можна класифікувати фактори ризику в межах матриці оцінювання ризику (табл. 1).

Таблиця 1

Матриця оцінювання ризику

| Значущість наслідків | | | Імовірність події | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Авіаційне визначення* | *Значення* | *Ступінь* | *Якісна характеристика* | *Значення* | *Ступінь* |
| **Катастрофічні** | Руйнування обладнання. Численні людські жертви | A | **Часто** | Може відбуватися багаторазово | 5 |
| **Небезпечні** | Суттєве зменшення «запасу міцності», фізичний біль або навантаження, що не дозволяють гарантувати повне виконання операторами своїх завдань. Значні травми або смерть великої кількості людей. Значне пошкодження обладнання | B | **Періодично** | Може відбуватися час від часу | 4 |
| **Значні** | Суттєве зменшення «запасу міцності», зниження здатності операторів долати несприятливі експлуатаційні умови у результаті підвищення робочого навантаження або внаслідок умов, що знижують ефективність їх роботи. Серйозний інцидент. Тілесні ушкодження | C | **Рідко** | Мала ймовірність, але може відбуватися | 3 |
| **Незначні** | Перешкоди. Експлуатаційні обмеження. Використання аварійних процедур. Незначний інцидент | D | **Малоймовірно** | Дуже мала ймовірність події | 2 |
| **Дуже незначні** | Малозначні наслідки | E | **Майже неможливо** | Можливість настання події майже виключена | 1 |

**Висновки**

Якщо ризик не задовольняє заздалегідь встановлені критерії прийнятності, то варто спробувати зменшити його до прийнятного рівня або, якщо це не можна здійснити, до найменшого можливого рівня, використовуючи відповідні процедури щодо його зниження.

Можливі підходи до зменшення ризику включають:

- перегляд проекту системи;
- перегляд експлуатаційних правил;
- зміни в штатному розкладі;
- навчання персоналу методів нейтралізації небезпечних факторів.

## Список літератури


1. Безпека авіації /В.П. Бабак, В.П. Харченко, В.О. Максимов та ін. – К.: Техніка, 2004. – 584 с.

2. DOC 9859 AN/460. Руководство по управлению безопасностью полетов. – Монреаль: ИКАО, 2006. – 364 с.

3. Doc 7300. Конвенція про міжнародну цивільну авіацію – Монреаль: ИКАО, 2000.

4. Risk management and decision making in civil aviation. – Canada: Transport Canada, 2001. – 42 p.

УДК: 629.735.05

*І.В. Остроумов, кандидат технічних наук*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ОСНОВНІ ПЕРЕВАГИ ЗАСТОСУВАННЯ КОНЦЕПЦІЇ «МОБІЛЬНЕ НЕБО» ДЛЯ УКРАЇНИ

*В статті піднімаються питання пов'язані з забезпеченням необхідного рівня безпеки польотів засобів приватної авіації. Розкриваються основні принципи концепції «Мобільне небо» та приводяться основні переваги її застосування, у сучасних умовах, на території України.*

У сучасних умовах розвитку авіаційного транспорту все більше уваги приділяється до розвитку легкої та спортивної авіації. Величезна кількість переваг приватної авіації привертає до себе все більше і більше прихильників, про що свідчить постійно зростаюча кількість власників засобів легкої авіації.

Наша країна також не є винятком і наслідує світові тенденції розвитку приватної авіації. Одним з перших вагомих кроків у цьому напрямі, керівництвом нашої країни, було внесення змін до Положення про використання повітряного простору України [1, 2], затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 1 липня 2009 р. Внесені зміни дозволять привести до відповідності правові норми регулювання та обслуговування повітряного руху у повітряному просторі України до стандартів Євросоюзу.

Кардинальних змін у Положенні про використання повітряного простору України зазнав пункт 80, відповідно до якого тепер дозволяється не здійснювати запит про умови використання повітряного простору користувачами у разі виконання польотів повітряними суднами поза межами контрольованого повітряного простору організації повітряного руху на висоті не більш як 1500 метрів над середнім рівнем моря, крім польотів, що виконуються в тимчасово зарезервованому повітряному просторі, повітряному просторі, де управління повітряним рухом здійснюють органи управління Повітряних Сил Збройних Сил та інших державних органів, а також в межах зони з особливим режимом використання повітряного простору. Ця та інші зміни відкривають шлях до розвитку приватної авіації в Україні.

Перш за все ці зміни позитивно вплинуть на розвиток повітряної невідкладної медичної та рятувальної допомоги, повітряного таксі та екскурсійних програм. За прогнозами експертів широке використання легкої авіації призведе до значного зниження цін на авіарейси всередині країни. Подальший розвиток отримає авіація сільськогосподарського призначення.

Проте, наслідуючи сучасні тенденції розвитку світового авіатранспорту значного удару піддається загроза безпеки польотів. Крім того небезпеці наражаються пересічні люди, оскільки польоти на низькій висоті, як показує сумний досвід розвинених країн, не рідко закінчуються зіткненнями з різноманітними наземними об'єктами.

Однією з найважливіших причин, що впливають на значне зниження безпеки польотів засобів легкої авіації є практична неможливість використання наземних радіолокаційних станцій для організованого контролю за дотриманням правил виконання польотів у цій частині повітряного простору. Технічно майже неможливо забезпечити належний радіолокаційний контроль за польотами таких засобів у межах всієї країни. У цьому контексті головна увага приділяється проблемі контролю за польотами засобів легкої авіації біля меж заборонених для польотів зон. Застосування існуючих засобів радіолокаційного огляду та пеленгаційного виявлення низько літаючих засобів не завжди є ефективними у використанні особливо в умовах гірського рельєфу місцевості.

Одним з варіантів вирішення цієї проблеми у межах країни може бути застосування мереж мобільного зв'язку для забезпечення контролю за польотами засобів легкої авіації (концепція «Мобільне небо»), що крім цього дозволить значно розширити напрями розвитку сервісних та довідкових служб приватної авіації. Загальна структура концепції представлена на рис. 1.

У основі концепції покладена можливість застосування засобів мобільного зв’язку, сотового типу у приземній частині повітряного простору [3] при цьому обов’язковим є встановлення на кожному засобі легкої авіації пристроїв взаємодії з мережею мобільного зв’язку. У будові бортового обладнання використовуються стандартні GSM модулі, що дозволить знизити вартість обладнання та зробить його доступним для більшості користувачів. Видачу, облік та контроль наявності цих засобів повинна проводити державне підприємство.

При польоті у межах зони покриття постачальник послуг сотового зв’язку за допомогою власного серверного обладнання веде спостереження за координатами, висотою та швидкістю польоту засобу легкої авіації. Для визначення цих параметрів польоту застосовуються один чи декілька методів позиціонування у мережах сотового зв’язку (метод позиціонування за коміркою, позиціонування за рівнем сигналу, методика кута прибуття чи один з часових методів [4]). Розташування споживача мобільних послуг у повітрі дозволяє отримати кращу точність визначення координат порівняно з наземним для кожного з існуючих методів. Крім того, застосування сучасних каналів обміну даних (наприклад UMTS) дозволяє передавати з борту літака будь-яку інформацію.

Далі на сервері мобільного оператора виконується аналіз інформації, щодо положення та траєкторії польоту користувача. Зокрема виконується аналіз порушення меж зон заборонених до польоту, перевіряється дозволенність виконання зльоту чи посадки у даній місцевості. Параметри заборонених для польотів зон повинні обов’язково враховувати похибки визначення місцеположення користувача.

У випадку виявлення порушення правил використання повітряного простору інформація стосовно цього випадку передається, у автоматичному режимі, до спеціалізованих державних структур у компетенції яких розслідування подібних інцидентів.

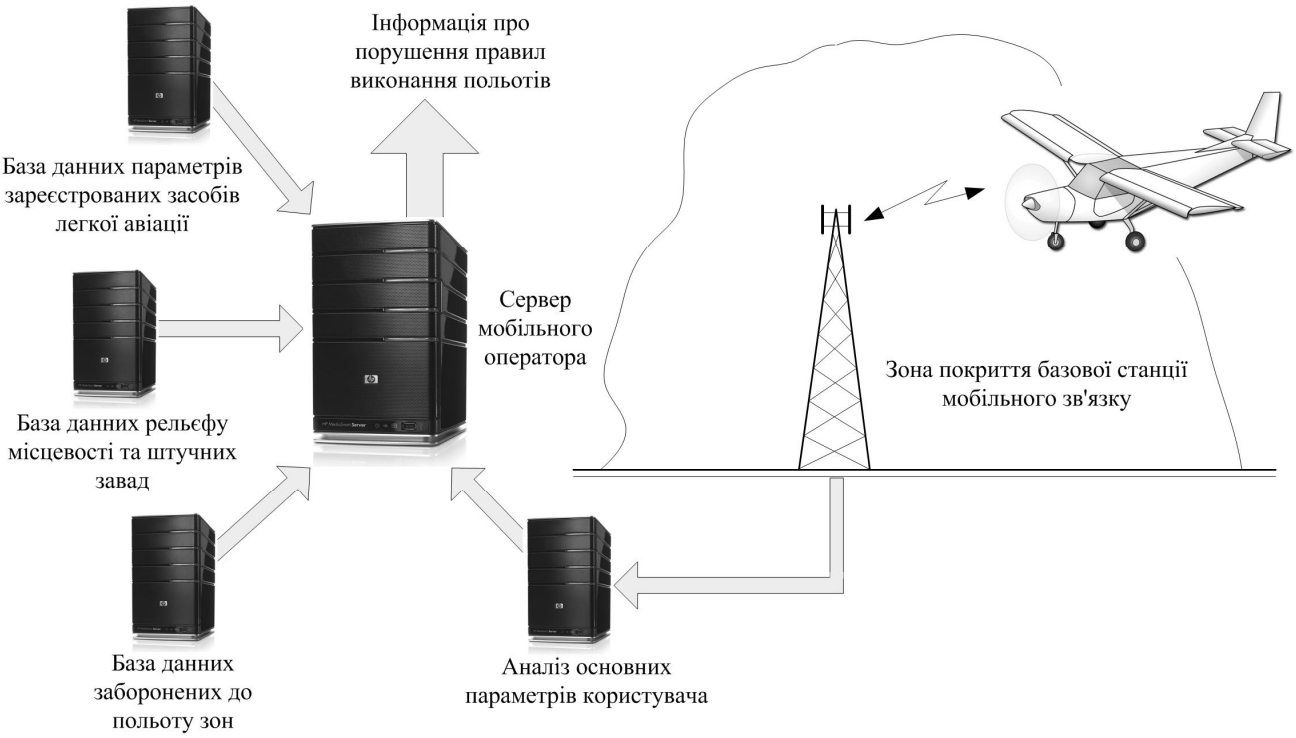



Рис. 1. Принцип організації концепції «Мобільне небо»

Однією з основних переваг застосування цієї концепції є можливість забезпечення контролю за злетом, посадкою та використанням приземного повітряного простору контроль за яким неможливо забезпечити іншими методами. Важливим є забезпечення контролю за зльотами та посадками приватних вертольотів, особливо у межах стратегічних, архітектурних, археологічних та інших об’єктів; у місцях великого скупчення людей; сільськогосподарських угіддях та інших місцях.

Застосування електронних карт та розгалуженої системи керування дозволить вводити тимчасові зони заборонені для виконання польотів (у місцях масового скупчення людей чи зон, що зазнали стихійного лиха).

Використання сучасних технологій мобільного зв'язку на борту засобу легкої авіації дозволить пілоту користуватися великою кількістю переваг (використання звичайних послуг зв'язку, використання екстреного зв'язку у випадку надзвичайних обставин, доступу до мережі Інтернет для перегляду прогнозу погоди, необхідних навігаційних карт та іншої корисної інформації).

Аналізуючи отриману польотну інформацію та тратторію польоту можливим стає організація сервісів попередження небезпечних режимів польоту у тому числі і небезпечних зближень з земною поверхнею та штучними перепонами.

Застосування методів мобільної навігації та електронної картографії дозволить забезпечити пілота потрібною інформацією о поверхні землі та наявності штучних завад, що є важливим при виконанні польотів у складних метеоумовах та при польотах у темний час суток.

На сьогоднішній день оператори мобільного зв'язку здатні забезпечити свої послуги на переважній частині території України, крім того зона дії постійно розширюється а обладнання удосконалюється. В умовах використання мобільного зв'язку для потреб авіації частково можливим стає застосування нових конструкцій башт базових станцій та нових конструкцій антенних систем, що забезпечуватимуть більшу зону покриття у вертикальній площині.

Порівняно нескладна будова бортового обладнання взаємодії з мережею мобільного зв'язку забезпечить його доступність та можливість встановлення на різних засобах приватної авіації. Паралельне використання у структурі бортового обладнання засобів супутникової навігації дозволить збільшити точність визначення свого місцеположення.

## Висновки

Введенні зміни у Положенні про використання повітряного простору України закладають чудові перспективи розвитку приватної авіації, проте одним з головних питань при цьому залишається забезпечення необхідного рівня безпеки польотів та гарантування безпечного неба для громадян.

Представлена концепція дозволяє забезпечити навколоземний контроль у першу чергу за зльотом та посадкою засобів легкої авіації та довести факт порушення у разі його виявлення.

Наведені основні переваги застосування нової концепції контролю за навколоземним повітряним простором вказують на доцільність практичного використання в Україні, особливо в сучасних умовах розвитку приватної авіації.

## Список літератури


1. Постанова про використання повітряного простору України: від 29 березня 2002 р. № 401 / Кабінет міністрів України. – Офіц. вид. – К. : Парлам. вид-во, 2002.
2. Постанова про внесення змін до Положення про використання повітряного простору України: від 1 липня 2009 р. № 980 / Кабінет міністрів України. – Офіц. вид. – К. : Парлам. вид-во, 2009.
3. *Бабков В.Ю.* Сети мобильной связи. Частотно-территориальное планирование. 2-е издание / В.Ю. Бабков, М.А. Вознюк. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 220 с.
4. *Навігація.* Основи визначення місцеположення та скеровування / Б. Гофманн-Велленгоф, К. Легат, М. Візер; пер. з англ. за ред.. Я.С. Яцківа. – Львів: Львівський національний університет імені Івана Франка, 2006. – 443 с.

УДК 629.7.351

*Е.Е. Нечаев*
*(Московский государственный технический университет гражданской авиации, Россия)*

# НЕЛИНЕЙНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

*В докладе рассмотрены вопросы нелинейной обработки навигационных параметров для спутниковых навигационных систем с применением теории порядковых статистик.*

Проблема комплексирования спутниковых навигационных систем (СНС) с другими навигационными системами имеет более чем 35-летнюю историю [5]. Первоначально речь шла о комплексировании низкоорбитальных спутниковых навигационных систем 1-го поколения американской «Транзит» и отечественной «Цикада» [3, 7, 8]. В настоящее время с вводом в эксплуатацию систем 2-го поколения ГЛОНАСС и GPS в процессе комплексирования важную роль играет совместная обработка информации СНС с информацией других навигационных систем и устройств, так как на многих воздушных судах (ВС) помимо СНС используются такие средства как инерциальные и инерциально-доплеровские навигационные системы, курсо-доплеровские системы счисления, барометрические системы, аппаратура радиотехнических систем ближней и дальней навигации и др. Все ВС имеют радиовысотомеры, а на некоторых из них имеются базы данных о рельефе местности, над которой осуществляется полет [5].

Объединение на борту ВС навигационной информации, благодаря её избыточности, дает возможность повысить точность определения навигационных параметров и надежность навигационных определений [5].

До появления СНС наиболее совершенными средствами навигации ВС являлись инерциальные навигационные систем (ИНС). Одним из достоинств таких систем является их автономность, т.е. независимость от полей внешних источников, что обеспечивает перспективность их совместного использования с СНС. Комплексирование СНС и ИНС обеспечивает необходимое резервирование источников информации и позволяет уменьшить итоговую погрешность измерений, так как физическая природа и корелляционные свойства погрешностей этих систем существенно различны [6].

Действительно, погрешности ИНС в основном связаны с внешними магнитными и гравитационными возмущениями, механическими характеристиками чувствительного элемента. Вследствие этого, высокочастотная составляющая этих погрешностей мала по сравнению с СНС.

Однако обусловленная накоплением систематических ошибок низкочастотная составляющая погрешностей ИНС с увеличением времени наблюдения нарастает, что приводит к необходимости систематической переустановки ИНС [4].

В свою очередь, погрешности СНС характеризуются относительно более высоким уровнем высокочастотного шума, имеющего нулевое среднее. При этом эффект накопления низкочастотной составляющей погрешностей в СНС отсутствует [6, 9].

Таким образом, комплексирование даже таких разных по своей физической природе навигационных систем позволяет реализовать высокоточную систему навигации.

В зависимости от организации алгоритмов совместной обработки измерений различных датчиков навигационной информации выделяют следующие схемы комплексирования: разомкнутую, слабосвязанную и сильносвязанную [1].

Разомкнутая система предусматривает раздельное функционирование комплексируемых систем. При использовании разомкнутой комплексированной системы достигается простота реализации алгоритма, отсутствует необходимость в изменении принципа функционирования существующих систем, минимальны затраты на изготовление такой комплексированной системы. К недостатку разомкнутых систем можно отнести отсутствие корректиров-

ки ИНС при нерабочем приемнике спутниковой навигации (например, при отсутствии достаточного для навигации количества спутников) [1].

Следующей схемой комплексирования являются слабосвязанные системы. В слабосвязанных системах используются модели ошибок ИНС, что позволяет осуществить оценивание медленно меняющихся случайных параметров и компенсировать соответствующие погрешности. К достоинствам слабосвязанных систем можно отнести высокую точность определения навигационных параметров. Недостатком является необходимость доработки существующих систем, а также необходимость выполнять большой объем вычислительных операций при определении координат.

Описанные выше системы имеют один общий недостаток – точность всей системы определяется помехоустойчивостью приемника СНС. Для увеличения помехоустойчивости используются сильносвязанные системы. При этом система комплексирования представляет собой единую аппаратуру, состоящую из трех модулей: приемник СНС, модуль элементов ИНС и модуль вычислителя. Согласно [5], такая система позволяет увеличить помехоустойчивость навигационной системы. При этом сильно усложняется конструкция и требуется вмешательство в работу приемников.

Для обработки координат ВС в случае ограниченного объема измерений можно применить метод порядковых статистик или «теорию малых выборок».

Теория порядковых статистик определяет свойства объектов, занимающих определенные места (ранги) в упорядоченной выборке. Оказывается, что упорядочивая совокупность случайных неизвестных (в нашем случае координат ВС), можно значительно улучшить статистические оценки и делать их лишь по рангам элементов [2].

Для оперативного определения навигационных координат нецелесообразно использовать большое количество датчиков навигационной информации, достаточно, например, ограничиться тремя.

С целью выбора оптимального нелинейного алгоритма обработки навигационных параметров трех слабосвязанных комплексированных навигационных систем рассматривались следующие методы:

1. Метод обычного усреднения (МОУС), когда результирующее значение определяется путем усреднения трех величин, $x_{\text{МОУС}} - \frac{a+b+c}{3}$, где $a$, $b$, $c$ – минимальное, среднее и максимальное значение навигационного параметра;
2. Медианный метод (ММ), предполагающий выбор среднего значения двух крайних величин измеренного параметра, $x_{\text{ММ}} = \frac{a+c}{2}$;
3. Метод двойного усреднения значений, полученных ММ и МОУС (МДУСМО), т.е. $x_{\text{МДУСМО}} = \frac{x_{\text{ММ}}+x_{\text{МОУС}}}{2} = \frac{5a+2b+5c}{6}$.

Для анализа предложенных нелинейных алгоритмов и выбора оптимального из них, обладающего наименьшей среднеквадратической ошибкой, было проведено численное моделирование.

Численное моделирование было проведено для законов распределения измеренных параметров.

Для отбраковки «отскочивших» значений навигационных параметров при их распределении по нормальному закону использованы следующие пороговые значения (Р): 0,75; 0,85; 0,95; 1,05 и 1,15. При этом среднее значение порядковой статистики для среднего значения принимаем равное нулю ($a_0 = 0$), а значение среднеквадратического отклонения — равное единице ($\sigma = 1$). Первое пороговое значение 0,75 соответствует среднему значению порядковой статистики максимального значения.

В случае равномерного распределения пороговые значения (*P*) иные: 0,25; 0,3; 0,35; 0,4 и 0,45, где значение 0,25 соответствует среднему значению порядковой статистики наименьшего значения.

Моделирование проводилось как для равноточных ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$), так и для неравноточных измерений ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$). Результаты моделирования следующие.

Для нормального закона распределения и равноточных измерений среднеквадратические ошибки в зависимости от величины порога P (ось абсцисс) приведены на рис. 1.

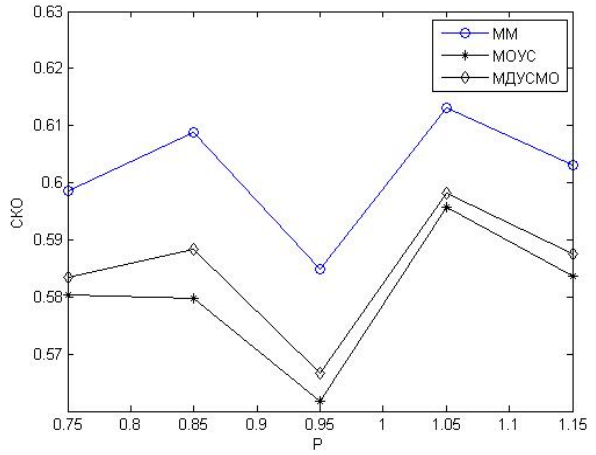



Рис. 1. Среднеквадратическая ошибка для нормального закона распределения и равноточных измерений.

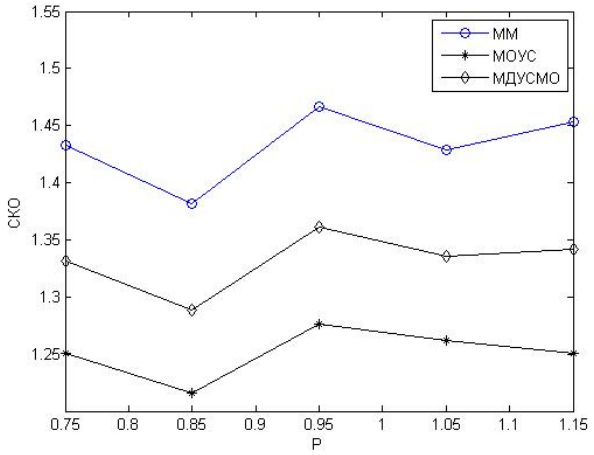



Рис. 2. Среднеквадратическая ошибка для нормального закона распределения и неравноточных измерений.

Как видно из рис. 1, среднеквадратические ошибки для указанных алгоритмов лежат в интервале 0,56…0,615, при этом среднеквадратические ошибки каждого измерительного датчика были равны единице, т.е. $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 1$. В случае неравноточных измерений ($\sigma_1 = 1, \sigma_2 = 2, \sigma_3 = 3$) и нормального закона распределения ошибки иные (рис. 2). Они распределены в диапазоне 1,2..1,47, а наименьшими из них также обладает МОУС.

При равномерном законе распределения минимальными среднеквадратическими ошибками обладает ММ (рис. 3).

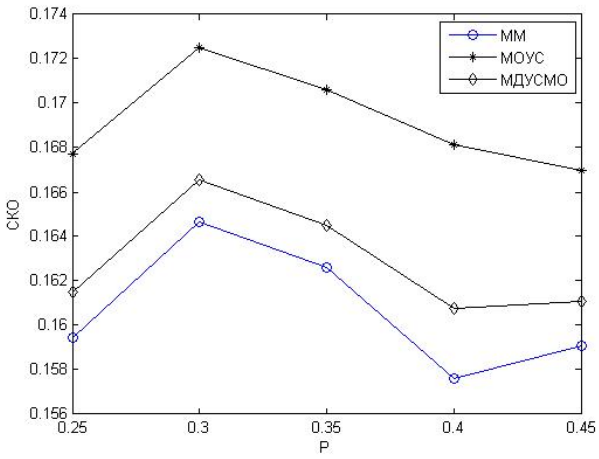



Рис. 3. Среднеквадратическая ошибка для равномерного закона распределения и равноточных измерений.

Ошибки лежат в интервале 0,157..0,173 для случая равноточных измерений. В случае неравноточных измерений интервал, в котором находятся среднеквадратические ошибки, изменяется: 0,35..0,394 (рис. 4), при этом наименьшими ошибками обладает МОУС.

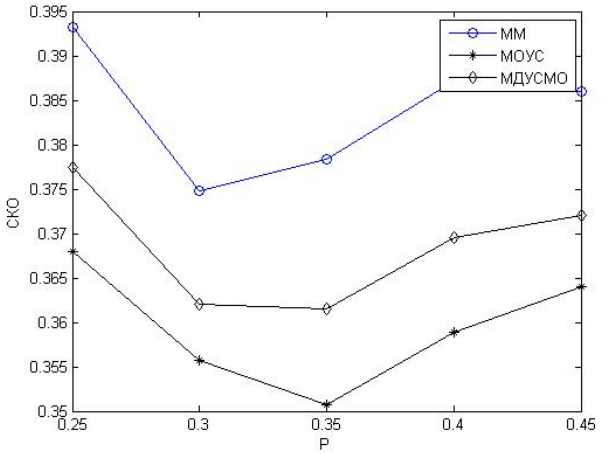



Рис. 4. Среднеквадратическая ошибка для равномерного закона распределения и неравноточных измерений.

## Выводы

Во всех рассмотренных случаях значения ошибок МДУСМО находятся между значениями, полученными по ММ и МОУС (рис. 1…4).

Таким образом, независимо от вида закона распределения крайних значений: ограниченного-равномерного и неограниченного-нормального, среднеквадратические ошибки МДУСМО при равноточных измерениях имеют значения, не превышающие значений ошибок по МОУС при равномерном законе распределения и значений ошибок по ММ при нормальном законе распределения крайних значений порядковых статистик.

Поскольку на практике невозможно априорно определить какому закону распределения подчиняются измеренные навигационные параметры, то выбор МДУСМО имеет преимущество, обеспечивая усредненные среднеквадратические ошибки, не зависящие от закона распределения порядковых статистик.

### Список литературы

1. *Аникин А.Л., Оганесян А.А., Аксенов С.Ю., Морозов А.С.* Методы комплексирования приемника спутниковой навигации и инерциальной навигационной системы. Результаты экспериментальных исследований слабосвязанного алгоритма комплексирования в городских условиях, ж. Новости навигации, М., НТЦ «Интернавигация», 2008, №4, с. 25-29.

2. *Гильбо Е.П., Челпанов И.Б.* Обработка сигналов на основе упорядоченного выбора (мажоритарное и близкие к нему преобразования), М., Сов.радио, 1976, 281 с.

3. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под.ред.*В.Н. Харисова*, *А.И. Перова, В.А. Болдина*, М., ИПРЖР, 1998, 688 с.

4. Информационные технологии в радиотехнических системах / Под. ред. *И.Б. Федорова*, М., Из-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2004, 766 с.

5. *Соловьев Ю.А.* Комплексирование глобальных спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS с другими навигационными измерителями (обзор), М., ж. Радиотехника, 1999, №1, с.3 – 21.

6. *Соловьев Ю.А.* Системы спутниковой навигации, М., Эко-Трендз, 2000, 260 с.

7. *Чуров Е.П.* Спутниковые системы радионавигации, М., Сов.радио, 1977, 272 с.

8. *Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич И.В.* и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы, М., Радио и связь, 1993, 361 с.

9. *Salychev O.S.* Applied inertial navigation: problem and solutions, M., BMSTV Press, 2004, 294 p.

УДК 621.391.82

*Е.О. Ковалевський, к.т.н. (НАУ, Україна)*

## ОЦІНКА ШВИДКОДІЇ АДАПТИВНИХ АНТЕННО-ПРИЙМАЛЬНИХ СИСТЕМ

*Проведена порівняна оцінка швидкодії деяких алгоритмів адаптації. Наведені результати моделювання.*

У зв'язку з розвитком супутникових технологій виникає потреба вирішення проблеми завадостійкості супутникових радіонавігаційних систем. Це особливо актуально для авіаційного використання, де першочергове значення займає забезпечення безпеки польотів. Для придушення завад успішно використовується просторова фільтрація, що реалізується за допомогою адаптивних антенно-прийомних систем [1-3].

Необхідність наближення до оптимальних адаптивних алгоритмів потребує оцінки їх якості при вирішенні конкретних задач. Основними показниками якості адаптивної системи (АС) є, в загальному випадку, ступінь придушення завади, швидкодія та стійкість. Такий показник, як швидкодія, має суттєве значення для бортової апаратури при швидкозмінній сигнально-завадовій обстановці, особливо при маневрі носія.

Оцінка швидкості протікання процесу адаптації потребує складання і вирішення диференційних рівнянь, що представляє певні труднощі.

У даній роботі робиться спроба порівняльної оцінки швидкодії для декількох варіантів адаптивних систем.

Найбільш розповсюдженим варіантом побудови адаптивних систем є схема реалізації з кореляційним зворотнім зв'язком.

Як показано в [1], вираз доля обчислення вагового коефіцієнта (одноканальний компенсатор) приймає вигляд

$$\omega(t)=\left\{\exp\left[-\left(1+\gamma\overline{U}_n^2\right)\right]\frac{t-t_0}{T_n}\right\}\omega_0(t_0)+\left(1+\gamma\overline{U}_n^2\right)^{-1}\cdot\left\{1-\exp\left[-\left(1+\gamma\overline{U}_n^2\right)\right]\frac{t-t_0}{T_n}\right\}\gamma\cdot\overline{U}_n^*\overline{U}_{n0} \quad (1)$$

де $U_0$ та $U_n$ - напруги в основному і компенсаційному каналах відповідно.

З (1) видно, що еквівалентна постійна часу АС дорівнює $T_э=T_И/(1+\gamma\overline{U}_n^2)$ та залежить від постійної часу інтегрування $T_И$, коефіцієнту підсилення у колі зворотного зв'язку $\gamma$ і потужності завади $\overline{U}_n^2$.

Від значення коефіцієнту $\gamma$ залежить також стійкість роботи системи. Але в даному розгляді , вважаємо , що система стійка.

Зупинимося на параметрі $T_И$ . Від часу інтегрування залежить точність кореляційної поправки $\overline{U_n^x U_{n0}}$ в коефіцієнті $\omega(t)$, що уточнюються на кожному кроці ітерації. При допущенні стаціонарності процесів $U_n(t)$ та $U_0(t)$ середнє значення взаємнокореляційної функції $\overline{U_n^x(t)\cdot U_0(t)}$ обчислюється відповідно виразу $R_{n0}(\tau)=\frac{1}{T_И}\int_0^{T_И}U_n^*(t)\cdot U_0(t+\tau)dt$.

В [4] показано, що якщо для усього діапазону вимірюваних значень $|R_{n0}(\tau)|$ має місце нормальний розподіл, , а як інтегратор приймається фільтр нижчих частот, то доречний вираз для дисперсії помилки обчислювання $R_{n0}(\tau)$

$$\delta^2{}_R(\alpha,\beta)=\frac{2\beta-1-2e^{2\beta}+\left[(2\alpha+1)(2\beta-1)-2\alpha^2\right]e^{-2\alpha}}{2\beta^2}$$

де $\alpha=\pi\beta\tau,\beta=\pi BT$ , В - смуга частот фільтру.

Для великих $\beta$ і будь-яких $\alpha$, що задовольняють відношенням $0 \le \alpha \le \beta$,

$$\delta^2{}_n(\alpha,\beta) = \frac{k}{\beta} \text{ , } 1 < k < 2 \text{ .}$$

Звідси слідує , що необхідний час інтегрування дорівнює

$$T = \frac{1}{\pi B \delta_R{}^2(\alpha,\beta)} \qquad (2)$$

Оцінимо вплив помилки корелятора на ефективність придушення завади адаптивною системою на моделі АС з обчисленням вагових коефіцієнтів за формулою Вінера-Хопфа [1]

$$W = R^{-1} \cdot S \text{ ,}$$

де W - вектор вагових коефіцієнтів розмірності N; N - число елементів антенної решітки (АР);
R – кореляційна матриця ( розміром N x N); S - вектор фазорів сигналів на елементах АР.

Математична модель АС складається із моделі формування вхідних сигналів , завад і шумів, обчислювача вагових коефіцієнтів і розрахунку коефіцієнту придушення завад у вигляді [3] :

$$Q = 20\lg(|G(\theta)|) - 20\lg(|G(\alpha s)|)$$

де $G(\theta)$ - діаграма спрямованості адаптивної антени; $\theta$ - кут приходу завади;
$\alpha s$ - кут приходу сигналу.

Змінюємо похибки компонент матриці R у вигляді адитивних додатків , що розподілені за нормальним законом з параметрами $[mr, sr]$, фіксуємо значення показника Q для АС з різним числом елементів N.

При $mr = 0$ результати моделювання наведені в таблицях 1,2.,3 відповідно для N = 2, 4, 8.

Таблиця 1 - Показник придушення завад при N=2

| Sr | $4\cdot10^{-2}$ | $8\cdot10^{-2}$ | 0,1 | 0,2 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|
| QдБ | -54,5 | -49,6 | -46,3 | -57,8 | -60 |

Таблиця 2 - Показник придушення завад при N=4

| Sr | $2\cdot10^{-2}$ | $4\cdot10^{-2}$ | $8\cdot10^{-2}$ | 0,1 | 0,2 |
|---|---|---|---|---|---|
| QдБ | -60 | -59,1 | -58,5 | -58 | -52 |

Таблиця 3 - Показник придушення завад при N=8

| Sr | $2\cdot10^{-2}$ | 0,1 | 0,2 |
|---|---|---|---|
| QдБ | -60 | -57,2 | -47 |

Як бачимо з розрахункових даних таблиць 1, 2, 3, похибки корелятора зменшують показник придушення завад тим більше , чим менше елементів N. Для системи з N = 2 прийняті похибки призводять до погіршення придушення завад на 5.5 ДБ.

Обчислимо необхідний час інтегрування , який дозволяє не погіршити показник Q більш, ніж на 5 ДБ, за формулою (2) для АС з параметром $B = \omega^7 T_n$

$$T_E = \frac{1}{\pi \cdot 10^7 \cdot 16 \cdot 10^{-4}} \approx 20\,\text{мск}$$

Розглянемо АС з використанням методу обчислення вагових коефіцієнтів за допомогою ітераційного уточнення зворотної кореляційної матриці [1] за алгоритмом

$$R^{-1}{}_{n+1} = R^{-1}{}_n - dR_n \text{ ,}$$

де $dR_n$ - поправка до оберненої матриці на кроці ітерації.

Дослідимо модель, у якій задано початкова матриця $R_0^{-1}$,проводиться уточнення матриці відповідно алгоритму, що наведено в [1].

Досліджуємо відношення значень першого елементу матриці поправок $dR_n$, до значень перших елементів матриці $R_n^{-1}$

$$dP_n = \frac{(dR_n)'}{(R^{-1}{}_n)'}$$

Вхідний потік моделі включає заваду, сигнал і шум. Відношення завада-шум позначимо
через $q$.

Результати моделювання при усередненні по $5 \cdot 10^4$ реалізацій, для $q$=40 ДБ і $q$=60 ДБ відповідно наведені в таблицях 4,5.,де kF – число ітерацій

Таблиця 4 - Залежність похибки ітераційного процесу при $q$=40 ДБ

| kF | 1 | 3 | 4 | 10 |
|---|---|---|---|---|
| dP | 0.52 | 0.5 | 0.19 | 0.086 |

Таблиця 5 - Залежність похибки ітераційного процесу при $q$=60 ДБ

| kF | 1 | 4 | 10 |
|---|---|---|---|
| dP | 0,78 | 0,23 | 0,1 |

Як бачимо з даних табл.. 4,5 - похибки обчислення зворотної кореляційної матриці практично не залежать від відношення завда/шум і наближуються до значення 0,1 практично на 10 ітерації .

Проаналізуємо варіант побудови АС на базі вимірювання кута приходу завади.

Алгоритм, що синтезований по критерію максимуму функцій правдоподібності , для вимірювання пеленгу постановника завади передбачає отримання оцінки пеленгу по одному підрахунку даних з елементів АР. Оцінка отримується з помилкою. Враховуючи особливості роботи АС апаратури супутникової радіонавігації для покращення оцінки має сенс застосувати послідовну (калмановську)фільтрацію. Оцінимо час встановлення в двох варіантах калмановських фільтрів за допомогою математичного моделювання.

Вважаємо, що в результаті вимірювання кута одержана оцінка у вигляді $\hat{\theta} = \theta + \delta_\theta$ ,
де $\theta$ - реальне значення кута, $\delta_\theta$ - випадкова помилка.

При великому відношенні сигнал/шум на вході вимірювача можна допустити , що похибка $\delta_\theta$ розподілена за нормальним законом . Проведене моделювання одноцільового вимірювача підтвердило ще допущення.

Модель скалярного фільтра Каламана представимо у вигляді [5] :

$$\left.\begin{aligned} \hat{\theta}(n) &= \hat{\theta}(n-1) + k(n)\left[\theta(n) - \hat{\theta}(n-1)\right] \\ k(n) &= \frac{P(n-1) + \sigma_g{}^2}{\sigma_\theta{}^2 + \sigma_g{}^2 + P(n-1)} \\ P(n) &= \sigma_\theta{}^2 \cdot k(n) \end{aligned}\right\}$$

де $\sigma_g$ - СКВ обумовлене рухом постановника завад.

Модель фільтра Калмана-Ширмана описується виразом [5] :

$$\hat{\theta}(n) = \hat{\theta}(n-1) + \frac{D_n}{D_{n0}}\left(\theta(n) - \hat{\theta}(n-1)\right),$$

$$\frac{1}{D_n} = \frac{1}{D_{n-1} + D_б} + \frac{1}{D_{n0}}$$

де $D_n$ - апостеріорна дисперсія; $D_{n0}$ - дисперсія початкового відліку;
$D_б$ - дисперсія, що визначається рухом постановника завад .

Досліджуємо просту ситуацію, коли постановник завади – нерухомий і істинне значення пеленгу $\theta$ помалу флюктурує за нормальним законом з параметрами $[0, \sigma_g]$.

Результати моделювання наведені у табл.6 – для першого , у табл.7- для другого варіанту фільтрів, де $\delta 1, \delta 2$ - середньоквадратичні відхилення похибки відповідно вимірюваного значення та поточної оцінки, kF – число ітерацій фільтру.

Таблиця 6 - Залежність похибок від числа ітерацій для першого варіанту фільтра

| kF | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\delta 1$ | 0.75 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.075 | 0.08 | 0.08 |
| $\delta 2$ | 0.075 | 0.057 | 0.046 | 0.041 | 0.035 | 0.032 | 0.031 |

Таблиця 7 - Залежність похибок від числа ітерацій для другого варіанту фільтра

| kF | 0 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\delta 1$ | 0.08 | 0.078 | 0.08 | 0.08 | 0.079 | 0.08 | 0,8 |
| $\delta 2$ | 0.076 | 0.055 | 0.045 | 0.039 | 0.032 | 0.024 | 0,017 |

Дані табл.. 6, 7 показують , що помітне покращення оцінки $\theta$ при фільтрації настає на 5-й ітерації.

## Висновки

За допомогою математичного моделювання встановлена залежність показника придушення завад адаптивною системою від помилки розрахунку кореляційної матриці. Це дозволило оцінити час інтегрування в адаптивній системі з кореляційним оберненим зв'язком, необхідний для забезпечення заданого рівня показника придушення завад. Отримана залежність дала можливість визначити достатнє з точки зору фіксації рівня придушення число ітерацій в адаптивній системі з ітераційним методом обчислення оберненої кореляційної матриці завад і в системі з виміряними кутами приходу завад та подальшою калмановскою фільтрацією. Наведена методологія може бути використана при виборі варіантів побудови адаптивної системи з точки зору оцінки її швидкодії.

## Список літератури


1. Адаптивная компенсация помех в каналах связи /под ред. *Ю.И. Лосева*. М.:Радио и связь,1988.- 208 с.

2. *Монзинго Р. А., Миллер Т. У.* Адаптивные антенные решетки / Пер. с англ. под ред. *В. А. Лексаченко*. - М.: Радио и связь, 1986. - 446 с.

3. *Ковалевский Э.А.* Адаптивная антенна СРНС с коррекцией оценки угла прихода помех// Матеріали VII Міжнародної конференції "Авіа-2006", 23-25 квітня 2006, т.2 "Аерокосмічні системи моніторингу та керування", Київ, НАУ, 2006, с.21.37-21.40.

4. *Бендат Дж*. Основы теории случайных шумов и ее приложения / пер. с англ. под ред. *В. С. Пугачева*, М.: Наука. - 1968. – 464 с.

5. Радіотехніка. Енциклопедичний навчальний довідник / за ред. Ю. Л. Мазура, Є. А. Мачуського, В. І. Правди. – К.: Вища школа, 1995. – 838 с.

УДК 621.356; 621.372

*Э.А. Ковалевский, канд. техн. наук (НАУ, Украина)*

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ СПУТНИКАХ ДЛЯ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

*Исследован способ навигационных определений с использованием передаваемой информации о спутниках, находящихся вне зоны видимости потребителя. Приведены результаты математического моделирования*

В настоящее время спутниковая радионавигация широко применяется для обеспечения всех этапов полета воздушного судна, вплоть до посадки по 1 категории метеоминимума. Дальнейшее развитие ее применения связано с проблемами улучшения системных характеристик с учетом использования в различных условиях. В частности, речь идет об обеспечении точностных характеристик в ситуациях, когда число видимых спутников, сигналы которых принимаются аппаратурой потребителя, минимально

Как известно, для решения задачи навигационных определений необходим прием сигналов не меньше, чем от 4 навигационных спутников (НС), для систем GPS или ГЛОНАСС и 5 при роботе одновременно с системами GPS и ГЛОНАСС.

При увеличении числа видимых НС улучшается точность определения координат в степени, зависящей от числа дополнительных по сравнению с минимально необходимым числом спутников и их геометрического расположения относительно потребителя.

Геометрическое расположение спутников сказывается на величине пространственной ошибки определения положения потребителя и характеризуется геометрическим фактором. Последний определяется согласно выражению [1]

$$GF = \left[ tr\left[ \left( H^T \cdot H \right)^{-1} \right] \right]^{1/2},$$

где $H$ - матрица направляющих косинусов (производные разности координат спутника и потребителя по дальности); $tr$ - след матрицы.

Чем меньше геометрический фактор, тем меньше пространственная ошибка навигационных определений (НО).

В [1] приведены усредненные данные о зависимости геометрического фактора от числа видимых спутников. Так при увеличении числа видимых спутников от 4 до 9 геометрический фактор понижается от 2,69 до 2,01.

Известны ряд подходов к привлечению дополнительных данных при минимальном числе видимых спутников. В первую очередь это использование псевдоспутников, расположенных в фиксированном месте и передающих сигналы, аналогичные сигналом спутника. В работе [2] рассматривается возможность улучшения геометрического фактора за счет приема сигналов различных частот одного спутника. В [3] предлагается использовать данные о навигационных спутниках, рассчитанные по альманаху, полученному с информацией от видимого спутника. В [4] предусматривается размещение в точках с известными координатами ретрансляторов навигационных радиосигналов спутников с тем, чтобы общее число сигналов было достаточно для навигационных определений.

Подход, рассматриваемый в роботе [ 4] ,требует дополнительной установки сложной аппаратуры. Способ, предложенный в роботе [2], нуждается в тщательной оценке степени выигрыша в точности по сравнению с усложнением навигационного приемника. Метод, рассматриваемый в роботе [3], эффективен лишь в периоды времени, когда данные альманаха мало отличаются от оперативных данных об эфемеридах.

Рассмотрим ситуацию, когда аппаратура потребителя работает в дифференциальном режиме, получая дифференциальные поправки от контрольной корректирующей станции (ККС). В случае, когда с места расположения ККС видно больше НС, чем принимается аппаратурой потребителя, имеет смысл передавать последнему данные для расчета

эфемерид всех спутников. Канал связи между ККС и потребителем предусмотрен при организации дифференциального режима и в нем имеются зарезервированные типы сообщений [5].

Исследуем предложенный способ при помощи математического моделирования. Блок-схема алгоритма модели приведена на рисунке.

При моделировании осуществляется следующие операции. Задаются:

- координаты потребителя;
- координаты НС, зафиксированных на определенный момент времени;
- NS – число видимых , NN – общее количество НС, с которыми решается задача НО;
- математические ожидания и среднеквадратические отклонения (СКО) ошибок;
- вспомогательные параметры для решения задачи НО в итерационном режиме;
- KR – число реализаций при статическом исследовании.

Открывается цикл по реализациям. Формируются радионавигационные параметры (РНП) для NS видимых спутников. Решается в итерационном режиме задача НО для NS спутников:

$$\bar{X} = \bar{X}_0 + \left(H^T \cdot H\right)^{-1} \cdot H^T \left(D_{\text{вим}} - D_{\text{вим}}\left(\bar{X}_0\right)\right), \quad (1)$$

где $\bar{X}_0$ - начальное значение координат потребителя на каждом итерационнрм шаге; $D_{\text{вим}}$ - вектор измеренных значений псевдодальностей, которые имитируются; $D_{\text{вим}}\left(\bar{X}_0\right)$ - вектор рассчитанных с использованием $\bar{X}_0$ значений псевдодальностей на каждом шаге итерации.

Имитируются данные о координатах невидимых потребителем спутниках $XN, YN, ZN$. Формируются псевдодальности до видимых спутников, а также псевдодальность до одного дополнительного спутника с использованием значений $XN, YN, ZN$ и $\bar{X}$. Решается навигационная задача (1) для NS плюс один спутник. По новой оценке координат потребителя формируются РНП следующего добавляемого спутника. Процедура повторяется в итерационном режиме до перебора всех дополнительных спутников.

Рассчитываются ошибки определения параметров потребителем при НО для NS спутников и для NN спутников в виде

$$R = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2},$$

где $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ - ошибки расчета координат, $x, y, z$ - потребителя.

Выполняется накопление ошибок и после окончания цикла по реализациям определяется $\sigma R_1$ (по NS) и $\sigma R_2$ (по NN) СКО ошибок . Вычисляется также геометрический фактор GF.

Машинный эксперимент проводится при следующих параметрах:

$\delta t = 6$м - СКО ошибки измерения псевдодальности в приемнике;

$\delta\xi = 2,6$ м - СКО ошибки формирования псевдодальностей по координатам невидимых спутников; NS=4; NN=7.

Варьируются 9 вариантов перебора дополнительных спутников из созвездия восьми НС.

Результаты эксперимента приведены в таблице. Ошибки измеряются в км.

*Таблица 1.*

| Вар. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| GF | 1,82 | 2,13 | 1,86 | 1,52 | 1,51 | 1,52 | 1,48 | 1,78 | 3,4 |
| $\sigma R_1$ | 0,29 | 0,28 | 0,29 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
| $\sigma R_2$ | 0,09 | 0,06 | 0,08 | 0,06 | 0,06 | 0,06 | 0,07 | 3,8 | 8,2 |

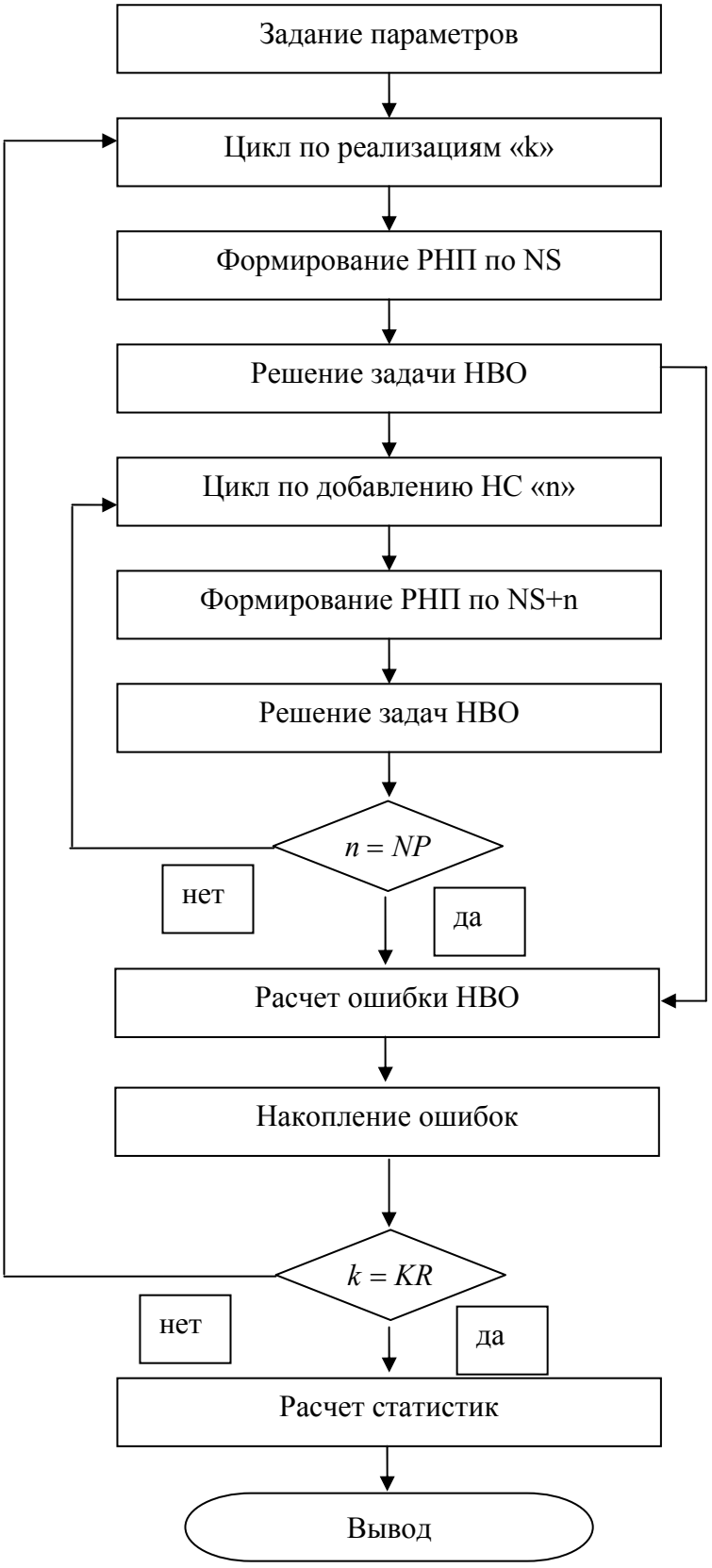



Рис.1. Блок-схема алгоритма модели

Как видно из табл.1, выигрыш в точности при добавлении эфемеридной информации о трех невидимых спутниках в определенных сочетаниях составил 3-4 раза. Геометрический фактор при этом не превышал значения 2,13.В вариантах 8, 9 при большем геометрическом факторе точностные показатели ухудшились. Это можно объяснить увеличением ошибки оценки координат потребителя при добавлении данных о неудачно расположенном спутнике.

## Выводы

Анализ полученных результатов показывает, что привлечение данных о дополнительных по сравнению с минимально необходимым числом спутников позволяет существенно повысить точность навигационных определений в подавляющем большинстве рассмотренных вариантов (1-7). Однако при некоторых сочетаниях основных и дополнительных спутников точность определений ухудшается (вар. 8, 9). Поэтому целесообразно ввести в алгоритм навигационных определений контроль изменения геометрического фактора после добавления очередного дополнительного спутника для исключения неблагоприятных вариантов.

## Список литературы

1. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под. ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2005 – 688 с.

2. *Ковалевський Е.О., Конін В.В., Погурельський О.С.* Використання сигналів різних частот супутника для підвищення точності навігаційних визначень // Вісник НАУ. N 1, К.:НАУ, 2008. с.8-11.

3. *Ковалевський Е.О.* Використання віртуальних супутників для навігаційних визначень // Вісник НАУ, N 3, К.: НАУ, 2008, с. 95-98.

4. *Верещак О.П., Піскорж В.В., Рудіч О.В.* Спосіб визначення параметрів руху користувача за сигналами супутникових радіонавігаційних систем / Опис до деклараційного патенту на винахід, Бюл. N 9, 2004 р.

5. Рабочий документ C-WP/11519, 13/2/01. ICAO, 2001 г.

УДК 621.396.933(043.2)

*О.В. Куценко, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІКУ ДИФЕРЕНЦІЙНОЇ ПОПРАВКИ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ

*В статті представлене експериментальне дослідження впливу віку диференційної поправки на точність визначення координат, при проведенні навігаційних вимірів в диференційному режимі.*

## Вступ

Відповідно до концепції CNS/ATM (зв'язок навігація спостереження / організація повітряного руху) передбачається перехід до супутникової навігації, як до основного засобу навігаційного обслуговування на всіх стадіях польоту повітряного судна, включаючи посадку[1]. Таким чином посилена увага приділяється таким характеристикам супутникових навігаційних систем як точність цілісність доступність та експлуатаційна готовність.

## Постановка завдання

За даними ІКАО [2] точність (два сигма) в горизонтальній площині при заході на посадку по першій категорії метеомінімуму складає 16,0 м, а в вертикальній площині від 4,0 м до 6,0 м. Тоді як гарантована точність супутникової навігаційної системи GPS в горизонтальній площині складає 13 м, а в вертикальній 22 м.

Оскільки сама по собі супутникова навігаційна система не дозволяє здійснити посадку повітряного судна, то передбачається створення в зоні аеродрому контрольно-корегувальної станції (ККС). ККС являє собою комплекс який складається з кількох (від одного до чотирьох) навігаційних приймачів. ККС призначена для забезпечення всіх типів заходу на посадку, посадок вилетів і наземних операцій і може забезпечувати операції на маршруті і в районі аеродрому. ККС виконує такі функції як забезпечення локальних поправок до псевдовідстані та псевдошвидкості, забезпечення даних про ККС, забезпечення даних для кінцевої ділянки заходу на посадку, забезпечення прогнозування даних про експлуатаційну готовність навігаційного супутника та забезпечення контролю цілісності навігаційного сузір'я.

Однією з найважливіших функцій ККС являється формування диференційних поправок до псевдовідстані та псевдошвидкості для кожного з навігаційних супутників які знаходяться в зоні видимості ККС. Розглянемо, що являють собою дані поправки. Поправка до псевдовідстані розраховується за формулою (1):

$$PRC = \sqrt{(x_s - x)^2 + (y_s - y)^2 + (z_s - z)^2} - PSR\,, \qquad (1)$$

де: $PRC$ – поправка до псевдовідстані;

$x_s, y_s, z_s$ – координати навігаційного супутника для якого формується поправка;

$x, y, z$ – координати фазового центра антени навігаційного приймача ККС;

$PSR$ – псевдовідстань виміряна навігаційним приймачем ККС.

Поправка до псевдошвидкості розраховується за формулою (2):

$$RRC = \frac{PRC - PRC_{t-1}}{\Delta t}\,, \qquad (2)$$

де: $RRC$ – поправка до псевдошвидкості;

$PRC$ – поправка до псевдовідстані отримана в даний момент часу;

$PRC_{t-1}$ – поправка до псевдовідстані отримана в попередній момент часу;

$\Delta t$ – інтервал часу між даною і попередньою поправками до псевдовідстані.

На борту повітряного судна виміряна псевдовідстань уточнюється за допомогою отриманих поправок за формулою (3):

$$PSR_{cor} = PSR + PRC + RRC \cdot \Delta T\,, \tag{3}$$

де: $PSR_{cor}$ – скоректована псевдовідстань;

$PSR$ – виміряна псевдовідстань на борту повітряного судна;

$PRC$ – отримана з ККС поправка до псевдовідстані;

$RRC$ – отримана з ККС поправка до псевдошвидкості;

$\Delta T$ – інтервал часу між моментами отримання поправки на ККС і отриманням псевдовідстані на борту повітряного судна.

Інтервал часу між моментами отримання поправки на ККС і отриманням псевдовідстані на борту повітряного судна $\Delta T$ називається віком диференційної поправки, або часом життя диференційної поправки. Очевидно, що найкращих результатів при визначенні координат можна досягти коли $\Delta T = 0$, тобто при одночасних визначеннях поправки на ККС і псевдовідстані на борту повітряного судна. Проте, в реальних умовах затримка в часі яка витрачається на формування і декодування повідомлень та на передачу даних здійснює вплив на точність навігаційних визначень. В даній статті представлене експериментальне дослідження залежності точності навігаційних визначень від віку диференційної поправки.

**Постановка експерименту:**

Для визначення точності навігаційних визначень використовувалися одночасні виміри взяті з двох навігаційних приймачів. Були використані навігаційні приймачі Novatel ProPak-LB plus та Novatel ProPak V3. Кожен з них являється двочастотним навігаційним приймачем геодезичного класу. Кожен з навігаційних приймачів провадив запис в файл даних ефемерид навігаційних супутників та вимірів кодової псевдовідстані. Виміри проводились з інтервалом в одну секунду протягом сорока хвилин. Таким чином було отримано більш ніж 2,5 тисячі вимірів псевдовідстані.

Координати фазових центрів антен навігаційних приймачів попередньо були визначені з високою точністю за допомогою програмного забезпечення Waypoint GrafNav/GrafNet 7.60. Дане програмне забезпечення використовується при проведенні геодезичної зйомки місцевості з використанням супутникових навігаційних систем.

Файли з навігаційними вимірами були оброблені за допомогою розробленого програмного продукту diff_nav. Даний програмний продукт призначений для проведення досліджень навігаційних вимірів зроблених в диференційному режимі. Даний програмний продукт функціонує в середовищі GNU OCTAVE – мови програмування високого рівня призначеній в основному для проведення математичних розрахунків. Дане програмне середовище являється альтернативою комерційному продукту MathWorks MATLAB яка розповсюджується за ліцензією GPL. Мова Octave оперує арифметикою дійсних і комплексних скалярів і матриць, має розширення для вирішення лінійних рівнянь алгебри, знаходження коріння системи нелінійних рівнянь алгебри, роботи з поліномами, вирішення різних диференціальних рівнянь, інтеграції системи диференціальних і диференційно-алгебраїчних рівнянь першого порядку, інтеграції функцій на кінцевих і нескінченних інтервалах. Вхідними даними для розробленого програмного продукту diff_nav являються координати фазових центрів антен навігаційних приймачів, максимальне значення віку диференційної поправки, а також файли з навігаційними вимірами представленими у форматі novatel binary. Вихідними даними програмного продукту являється залежності середньоквадратичного значення похибки визначення координат X,Y та Z в системі ECEF від віку диференційної поправки представлені в графічному вигляді. Програма для кожного виміру псевдовідстані одного приймача, за допомогою виміру псевдовідстані іншого приймача (взятого з урахуванням заданого значення віку диференційної корекції) провадить розрахунок диференційної поправки за формулами (1) і (2). Координати супутника

розраховуються за методикою представленою в [3] з використанням даних ефемерид. Потім виміряна псевдовідстань уточнюється за формулою (3), і визначаються координати приймача. Отримані координати порівнюються з заданими еталонними координатами, і таким чином знаходиться похибка визначення координат. Далі знаходиться середнє значення даної похибки за всіма вимірами навігаційного приймача. Розрахунки повторюються для нового значення віку диференційної поправки. Алгоритм роботи програми представлений на рис. 1.

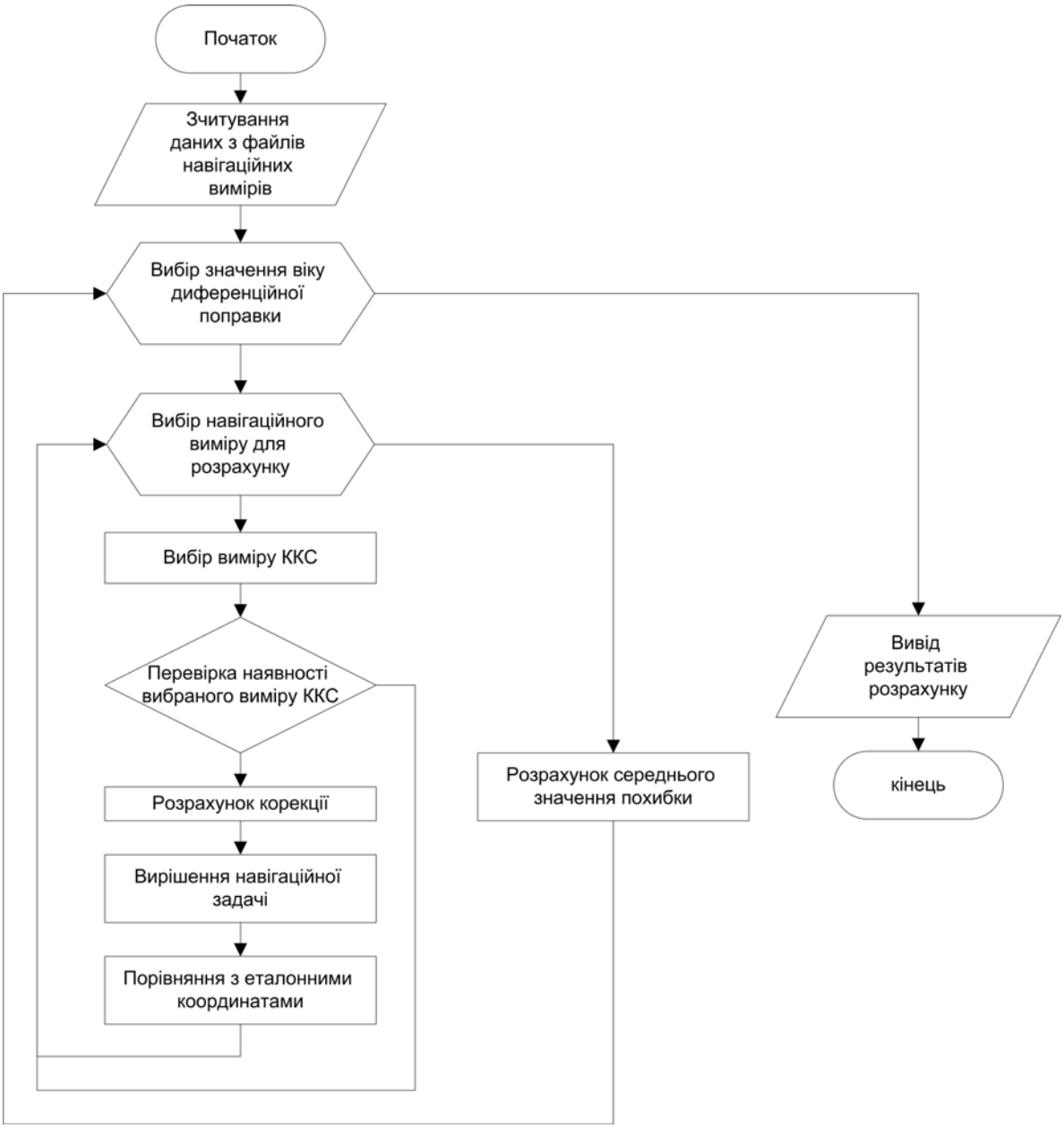



Рис. 1. Алгоритм роботи програмного продукту diff_nav.

**Результати експерименту.**

Результати роботи програмного забезпечення представлені на Рис. 2. На даному рисунку представлені залежності середньоквадратичної похибки вимірювання координат X, Y та Z в системі ECEF (взяте в метрах) від значення віку диференційної поправки (взяте в секундах). Зірочками показані розраховані програмою значення.

Також для порівняння за експериментальними даними були розраховані середньоквадратичні похибки вимірювання координат при проведенні навігаційних визначень без використання диференційного режиму.

Середньоквадратичне значення похибки по координатах X, Y та Z в системі ECEF складає відповідно:

$\sigma_x$=3,47 м;

$\sigma_y$=3,24 м;

$\sigma_z$=10,76 м.

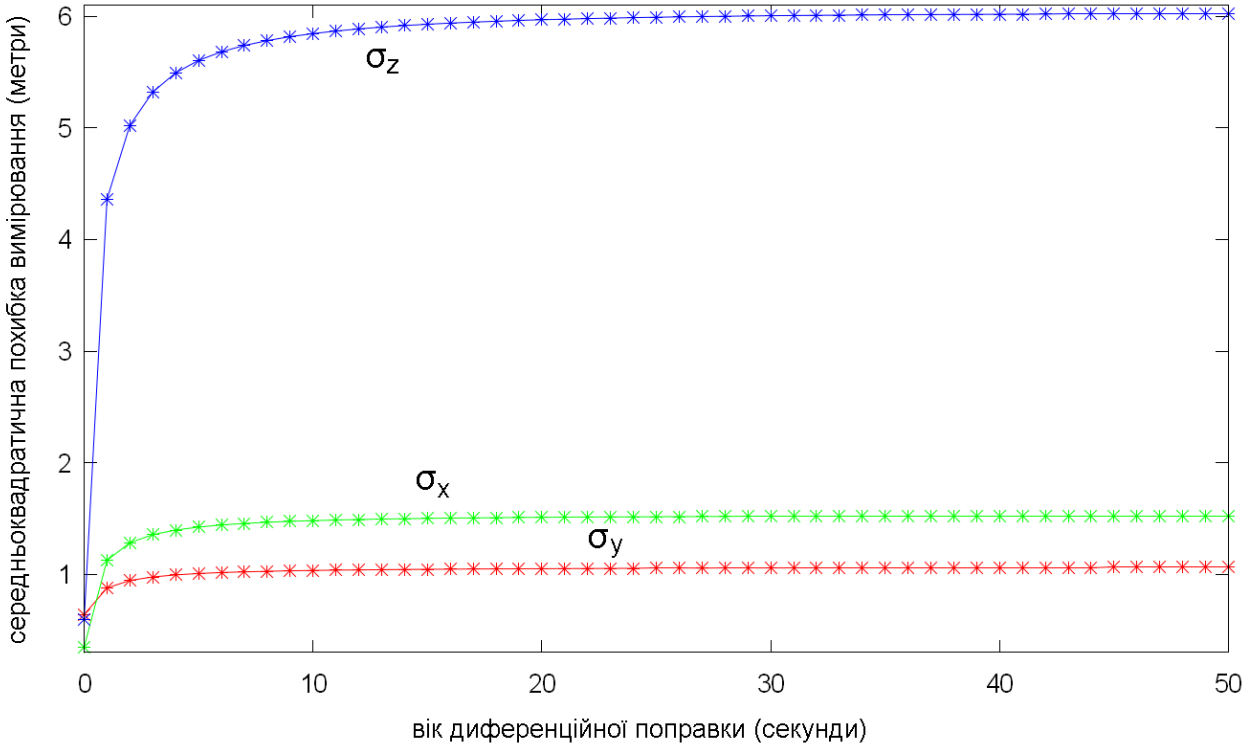



Рис. 2. Залежність середньоквадратичної похибки вимірювання координат від значення віку диференційної поправки.

## Висновки.

За результатами експерименту видно, що за перші кілька секунд збільшення віку диференційної поправки похибка визначення координат стрімко зростає. Потім збільшення похибки відбувається, хоч вже й не так стрімко, проте постійно. При досягненні певного критичного значення віку диференційної поправки точність визначення координат в диференційному режимі може стати меншою за точність визначення координат в звичайному режимі. Отже можна зробити висновок, про необхідність постійного моніторингу віку диференційної поправки.

Ідеальним варіантом є проведення одночасних навігаційних вимірів на ККС і бортовому приймачі. Проте при використанні даного варіанту оновлення інформації про координати буде відбуватися з запізненням яке обумовлене віком диференційної корекції. В будь-якому випадку вік диференційної корекції повинен бути якомога меншим. Цього можна досягнути збільшивши частоту передачі диференційної поправки.

## Список літератури

1. Бабак В.П., Конін В.В., Харченко В.П. Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328 с.

2. ICAO Приложение 10 Авиационная электросвязь том 1 шестое издание, 2006. – 606 с.

3. Navstar global positioning system interface specification draft is-gps-800, 2006 – 133 p.

УДК 621.396:621.372

*К.О. Миронов (Національний авіаційний університет, Україна)*

# ЗАЛЕЖНІСТЬ ГЕОМЕТРИЧНОГО ФАКТОРУ ВІД КОМБІНАЦІЙ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКІВ У СУЗІР'ЯХ GPS ТА ГЛОНАСС

*В статті проводиться аналіз геометричного фактору при різних комбінаціях супутників, що входять до складу навігаційних систем GPS та ГЛОНАСС. Показана принципова можливість визначення місцеположення користувача в умовах, коли окремо в системах є недостатня кількість видимих супутників.*

Основною вимогою до будь якої супутникової радіонавігаційної системи (СРНС) є точність вимірювань координат користувача, котра залежить від багатьох факторів. Немалу роль серед цих факторів має кількість видимих супутників, сигнали котрих отримує приймач користувача, та їхнього геометричного положення відносно місця розташування приймача. Мірою зменшення точності навігаційних визначень в СРНС через особливості положення супутників і користувача є геометричний фактор. Розрахунок геометричного фактору можливо використовувати як для оцінки потенційної точності, так і для прогнозу ситуації на запланований сеанс навігаційних визначень. Окремий інтерес представляє контроль геометричного фактору при використанні даних про невидимі для користувача супутники для навігаційних визначень[1].

В даній роботі вивчається зміна геометричного фактору при різних комбінаціях задіяних супутників із двох систем: GPS та ГЛОНАСС.

Розрахунок геометричного фактору проводиться за наступними формулами[2, 3]:

$$K_t = [tr(H^T * H)^{-1}]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

де $tr$ - слід матриці, $H$ - матриця напрямних косинусів:

$$H = \begin{bmatrix} \cos\alpha_1 \cos\beta_1 \cos\gamma_1 1 \\ \cos\alpha_2 \cos\beta_2 \cos\gamma_2 1 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \cos\alpha_n \cos\beta_n \cos\gamma_n 1 \end{bmatrix};$$

$$\cos\alpha_n = \frac{x_i - \tilde{x}}{D_i};\ \cos\beta_n = \frac{y_i - \tilde{y}}{D_i};\ \cos\gamma_n = \frac{z_i - \tilde{z}}{D_i};$$

$$D_i = \sqrt{(x_i - \tilde{x})^2 + (y_i - \tilde{y})^2 + (z_i - \tilde{z})^2};$$

$x_i, y_i, z_i$ -координати і - того супутника;

$\tilde{x}_i, \tilde{y}_i, \tilde{z}_i$ - оцінки координат користувача;

i =1…n.

В інженерному пакеті MATLAB розроблено програму, яка розраховує геометричний фактор для будь-яких комбінацій супутників з числа видимих, від яких було прийнято та записано навігаційне повідомлення. При цьому для запису навігаційних даних використовувався приймач PROPAK V3, який працює як за сигналами системи GPS, так і за сигналами системи ГЛОНАСС. Отже, програма дозволяє комбінувати супутники систем ГЛОНАСС та GPS. На рис.1 зображена блок-схема, що ілюструє роботу програми.

Вхідними даними для розрахунку геометричного фактору GDOP є дані, що отримані 28.04.2009 о 216783с. по часу GPS, а саме повідомлення, які мали параметр Message_ID=723, 8, 43, 101, 243, 270, 7, відомі координати користувача становили:

$x$ =3509768.1070; $y$ =2061618.1189; $z$ =4894200.5308.

Порядкові номери супутників GPS: 8, 13, 25, 23, 7, 4, 2, 16, 20 та ГЛОНАСС: 45, 39, 48, 55.

Експеримент 1. Розрахуємо для 9-ти супутників GPS, 4 ГЛОНАСС, 9 GPS + 4 ГЛОНАСС, для 3 часових інтервалів з'йому даних. Результати приведені в таблиці 1.

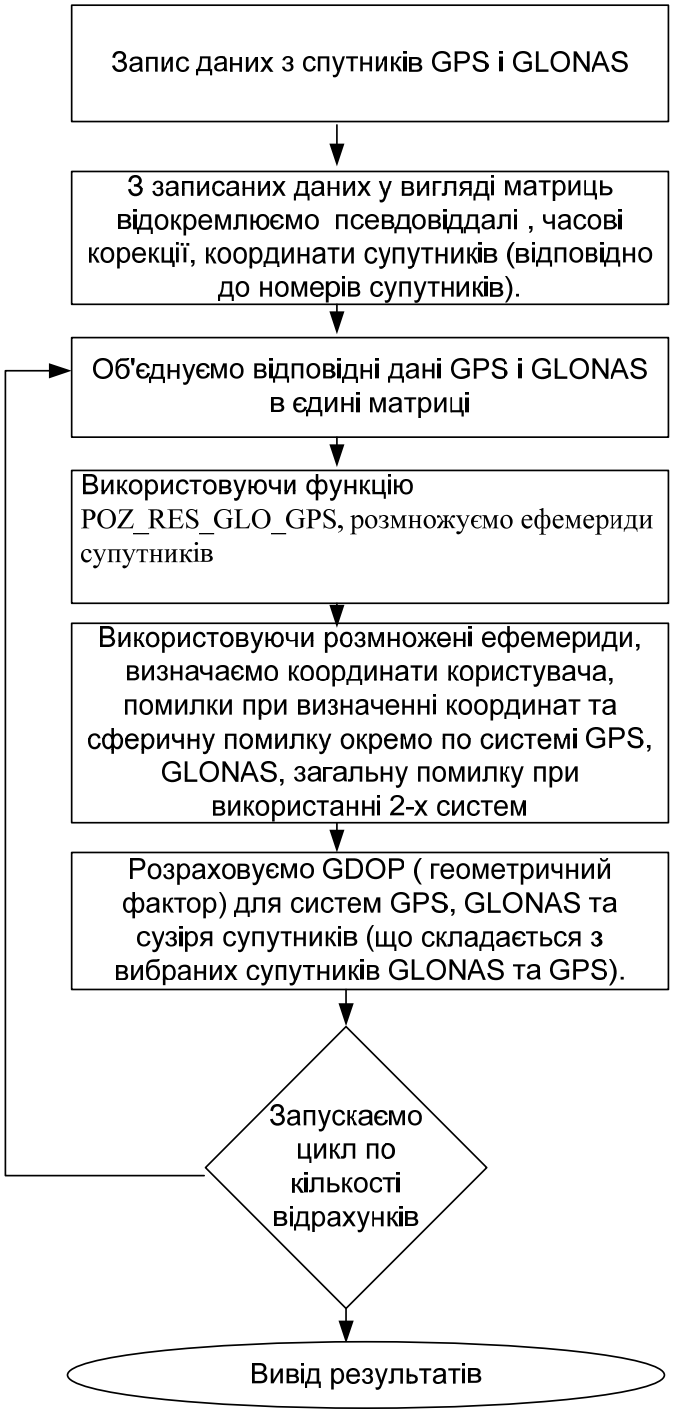



Рис.1 Блок-схема математичного моделювання

Таблиця1 - GDOP для різних СРНС

| Секунда виміру | Сузір'я GPS | Сузір'я ГЛОНАСС | Сузір'я що включає в себе GPS та ГЛОНАСС |
|---|---|---|---|
| 1с.<br>19с.<br>37с. | 2,0076307063080<br>2,0068284673539<br>2,0059659402047 | 33,56795161033<br>33,30144839254<br>33,03017551497 | 1,05561558143622<br>1,05378722470390<br>1,05194251049791 |

Вочевидь, що GDOP сузір'я ГЛОНАСС є набагато більшим, ніж критичний показник для GDOP=6. Це пов'язано з тим, що під час зняття даних у полі зору користувача знаходилось усього 4 супутники ГЛОНАСС, що мали погане геометричне розміщення відносно користувача. Сузір'я GPS складалось з 9 супутників і їхнє розміщення було набагато краще. З табл.1 також легко помітити, що при сумісному використані цих систем маємо значне поліпшення GDOP, що зумовлене зростанням кількості супутників до 13, 9 з котрих є віртуальними для системи ГЛОНАСС, і 4 для GPS. Причому покращення для системи GPS склало в 2 рази, а для системи ГЛОНАСС у 33.

Експеримент 2. Додаємо до сузір'я системи ГЛОНАСС два та один супутник взятий з системи GPS відповідно. Для нас вони будуть віртуальними, оскільки сузір'я ГЛОНАСС насправді складається лише з 4 супутників на даний момент часу. Тому отримані нами нові сузір'я будуть складатися з 6 (табл.2) та з 5 (табл.3) супутників.

Таблиця 2 - GDOP для сузір'я системи ГЛОНАСС та всіх можливих комбінацій одного віртуального та супутника №13 взятих з системи GPS.

| № віртуальних супутників | GDOP для останньої записаної секунди та другого додаткового супутника з №13 | GDOP для останньої записаної секунди та другого додаткового супутника з №4 |
|---|---|---|
| 8 | 2,32831796081830 | 2,28411750211558 |
| 13 | ---------- | 2,36672910354525 |
| 25 | 10,5395289527555 | 2,44230542249337 |
| 23 | 4,54220690885462 | 2,48424988666791 |
| 7 | 3,31048421873331 | 2,55907232567409 |
| 4 | 2,36672910354525 | ---------- |
| 2 | 4,09879440478189 | 2,69290882173011 |
| 16 | 2,76803783119643 | 2,33020337872932 |
| 20 | 18,2663513014297 | 2,47993953893131 |

Таблиця 3 - GDOP для сузір'я системи ГЛОНАСС та всіх можливих комбінацій одного віртуального супутника взятого з системи GPS.

| № віртуального супутника | GDOP для першої записаної секунди | GDOP для останньої записаної секунди |
|---|---|---|
| 8 | 2,69358485893299 | 2,68494679219898 |
| 13 | 29,6090811369832 | 29,2282547330684 |
| 25 | 14,1767528072506 | 14,0618511090680 |
| 23 | 5,00380587704295 | 4,98354110339907 |
| 7 | 4,07710577396815 | 4,05136718244573 |
| 4 | 2,82467046414138 | 2,79765164474295 |
| 2 | 4,69387011051022 | 4,63329173823192 |
| 16 | 3,22713452188764 | 3,18257353971160 |
| 20 | 19,8000206703906 | 19,7562676604061 |

Аналізуючи дані таблиць 2,3 можна стверджувати, що один додатковий супутник дозволяє дещо підвищити фактор GDOP, але не завжди доцільно використовувати велику кількість віртуальних супутників, оскільки виграш при їхньому використанні є досить мізерним. Достатньо намагатися обирати коректні супутники, а не нарощувати їхню кількість. Це видно з того, що при додаванні супутників №13 та №4 до супутника з номером 8 різниця склала всього 0.45, при тому, що при комбінації віртуальних супутників 25, 13 та 25, 4, виграшною є саме 25, 4 котра дає перевагу майже в 5 разів порівняно з 25, 13 та відповідно у 7 разів, якщо використовувати лише 25 супутник. Варто зазначити, що використання лише одного 8 супутника дає усього на 10% гірший результат ніж використання пари 25, 4 та є в 3.9 рази виграшним відносно комбінації супутників 25, 13. Подібні висновки можна зробити на основі 20, 23, 7 та інших супутників.

Експеримент 3. Додаємо до сузір'я системи GPS один супутник з системи ГЛОНАСС, отримані результати занесені до таблиці 4.

Таблиця 4 - GDOP для сузір'я системи GPS та всіх можливих комбінацій одного віртуального супутника взятого з системи ГЛОНАСС.

| № віртуального супутника | GDOP для першої записаної секунди | GDOP для останньої записаної секунди |
|---|---|---|
| 45 | 1,87011596902716 | 1,86671300677845 |
| 39 | 1,88919624927243 | 1,88890119668396 |
| 48 | 1,82369082853547 | 1,82403623903502 |
| 55 | 1,36817448011941 | 1,36537602181727 |

Вже після першого доданого супутника стало очевидно, що суттєву перевагу, котра складає понад 0,46, над іншими комбінаціями буде мати 55 супутник.

Експеримент 4. Моделюючи вимкнення обраних супутників для обох систем ми досягли моменту коли кількість супутників стала недостатньою або мінімальною, тобто коли по одній системі неможливо визначити місце положення користувача. Проте якщо до неї додавати віртуальні супутники, то зявиться можливість отримання місця положення користувача, незважаючи на що воно може бути досить неточними. Розрахунки GDOP для таких випадків наведено в табл.5.

Таблиця 5 - Геометричні фактори при критичних положеннях супутників на небі.

| № реальних супутників | № віртуальних супутників | GDOP |
|---|---|---|
| 8,25,23 | 48 | 86,7280833281 |
| 7,25,23 | 39 | 38,6618098285 |
| 8,25,23 | 39,48 | 6,9065190542 |
| 8,25,23 | 48,55 | 5,2841805617 |
| 8,25,23 | 39,55 | 3,9747901644 |
| 8,25,23 | 39,55,48 | 3,6406278246 |
| 8,25,23 | 39,55,45 | 2,2422634030 |
| 8,25,23 | 39,55,45,48 | 1,9527348610 |
| 8,25,2,16 | 39,55,45 | 1,9333203500 |
| 8,25,2,4 | 39,55,45 | 2,2224000112 |
| 8,25,2,4 | 48,55,45 | 1,9484085873 |

У табл.. 5 добре показано, що для критичних значень кількості супутників можливо досягти геометричного фактору меншого або ж близького до 4. Це видно з комбінацій 8, 25, 23, 39, 55, та 8, 25, 23, 39, 55, 48.

## Висновки

Результати дослідження показали, що геометричний фактор суттєво залежить від вибору супутників сузірь GPS та ГЛОНАСС, для навігаційних визначень. Цім результатам потрібно приділяти особливу увагу, при проведенні навігаційних визначень з використанням віртуальних супутників.

## Список літератури


1. *Ковалевский Є.О.* Використання віртуальних супутників для навігаційних визначень// Вісник НАУ, №3, 2008, с 95-98;
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования: изд. 3-е / под ред. *А.И. Перова, В.Н. Харисова.* − М.: Радиотехника, 2005. − 688 с.
3. *Бабак В.П., Конін В.В., Харченко В.П.* Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328с.

УДК 629.056.08:681.513.67(045)

*В.П. Харченко, д.т.н., проф., І.В. Васильєв*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МЕТОДИ БОРОТЬБИ З ЗАВАДАМИ В СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

*В статті піднімається проблема завадостійкості супутникової навігаційної апаратури. Розглядається вплив різних типів завад на роботу навігаційного обладнання та методи боротьби з ними.*

Розвиток супутникової навігації та застосування в найрізноманітніших сферах діяльності людини, особливо при вирішені спеціальних задач. Це зумовлює підвищення безпеки, і все більш набуває актуальність в досліджені впливу різних типів завад в роботі із супутниковою радіонавігаційною апаратурою і боротьбу з ними.

Завади можна поділити на два типи ненавмисні та навмисні. Основними ненавмисними завадами є електромагнітні завади.

Електромагнітні завади - електромагнітні поля будь-якого походження, наявність яких погіршує нормальну роботу радіоелектронних засобів. Відносно навігаційних радіосистем електромагнітні завади знижують здатність дії систем, розпізнання навігаційних сигналів і, як наслідок, точність місце визначення об'єкта. Деякі сторонні радіоелектронні системи можуть стати джерелами активних ненавмисних завад для супутникової навігаційної системи. Основними джерелами цих завад являється гармоніки дециметрових передавачів місцевих телевізійних станцій, сотові мережі базових станцій мобільного зв'язку, індивідуальні апарати мобільного зв'язку. Ці джерела дуже впливають на вирішення навігаційних задач, так, як супутникова радіонавігаційна система має низький рівень сигналу біля поверхні Землі, тому і виникають завади від вище зазначених служб, рівень сигналу яких вище, це приводить до так званого "багатокористувацького ефекту", а саме придушення сильним сигналом слабких навіть у випадку їх відмінності за типами модуляції та доступу.

До навмисних завад відносяться силова та інтелектуальна завада. Силове придушення, або імпульсно енергетичне діє наступним чином, розряд потужного накопичувача енергії формує потужний широкосмуговий імпульс, за допомогою якого необоротно порушується працездатність вхідних ланцюгів супутникових радіонавігаційних приймачів.

Інтелектуальна завада використовується для направлення користувача супутникової навігації по помилковому маршруту. Існує два види інтелектуальної завади, принцип роботи першого полягає в встановлені наземного спеціального обладнання, яке ретранслює сигнал від навігаційних супутників, які знаходяться в зоні видимості. При такій заваді навігаційний приймач користувача починає приймати більш потужний сигнал від ретрансляторів, та починає супроводжувати фазовий центр його антени. До цього фазового центра від спостережуваних супутників змінюються різниці псевдодальностей, що несуть поряд з ефемеридами інформацію про координати цієї фізичної точки, а далі в радіопроміні після ретрасляції ці різниці залишаються незмінними за будь-якої довжини траси від ретранслятора до навігаційного приймача. В результаті приймач реєструє не своє поточне місцеположення і свій вектор швидкості, а нерухомий фазовий центр антени ретранслятора і збивається з маршруту. Інший вид інтелектуальної завади, має наступний принцип роботи, встановлюється мінімум три псевдосупутника, які передають реальні коди навігаційних супутників. Рівень випромінювання вибирається той самий, як і в ретрансляторів. Фазіровка сигналів псевдоспутників вибирається такою, щоб при захопленні їх сигналів приймачем при вирішені навігаційної задачі і направлення його по помилковому маршруту.

Одним із дієвих способів боротьби з завадами є просторова фільтрація на основі адаптивної антенно-приймальної системи. Адаптивна антенно-приймальна система складається з антенної решітки та програмно-апаратного блоку, який виконує оцінку,

виділення та підсилення правдоподібного сигналу. Існує багато методів адаптивного керування, але для розробки конкретної системи потрібно вибрати алгоритми адаптації використовуючи ряд критеріїв, для наближення до оптимального рішення, при дотримані ряду обмежень, що накладаються на адаптивно антенно-програмну систему. Основними критеріями при побудові ААПС є, критерій мінімуму вихідної потужності перешкоди, критерій середньоквадратичного відхилення сигналу і максимального відношення сигнал/шум при малому рівні навігаційного сигналу. Ці критерії будуть використовуватися для оцінки показників ефективності для вибору метода побудови ААПС.

Адаптивну антенно-приймальну систему можна представити у вигляді загальної структури (рис. 1):

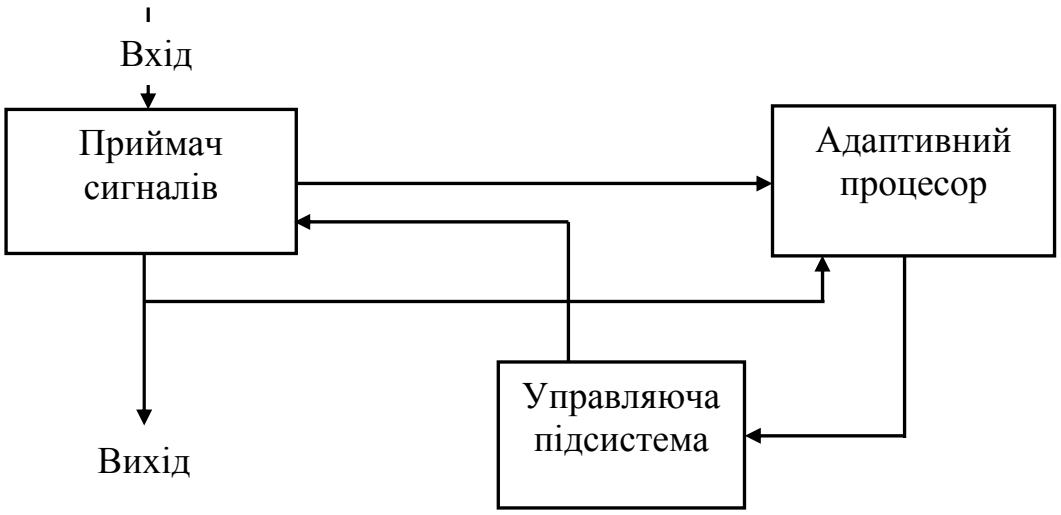



Рис.1. Загальна схема адаптивної антенно-приймальної системи.

На вхід ААПС поступають електромагнітні поля від навігаційних супутників і всі навмисні і ненавмисні завадові випромінювання. Після того, ААПС повинно перетворити інформативне електромагнітне поле з мінімальними втратами корисної інформації із максимальним придушенням завад. Адаптивний процесор виконує аналіз отриманої сигнально-завадної обстановки і вироблення сигналів зміни характеристик приймача за допомогою управляючої підсистеми.

Як зазначалось вище ефективність ААПС визначається вибором найбільш придатних алгоритму адаптації, включаючи в вибір ряд обмежень для ефективності роботи системи. Серед багатьох методів особливу увагу треба приділити таким, як прямий метод обчислення вагових коефіцієнтів, градієнтні методи визначення вагових коефіцієнтів, рекурентні методи.

Прямий метод обчислення вагових коефіцієнтів базується формування вагових коефіцієнтів з використанням обчислювачів співмножників, в формулі (1).

$$W_{opt} = R_{nn}^{-1} * r_{xd} \quad (1)$$

Так, як характеристики невідомі і постійно змінюються, тому необхідно обновляти значення вагового вектора, щоб відслідковувати зміни сигнально-завадової обстановки. Це приводить до необхідності постійно оцінювати вектор $B$ і матрицю $R$. Адаптивні пристрої, побудовані відповідно до описаного методу, стабільні й мають високу швидкість збіжності, що мало залежить від зовнішніх умов. До недоліків варто віднести необхідність загального обсягу (особливо при багаторозмірної антенної решітки) при визначенні й обігу кореляційної матриці і вплив дестабілізуючих факторів на точність результатів. Проблематичним є питання у виборі довгі вибірки сигналів для розрахунку кореляційних залежностей. З погляду статистичної достовірності результатів необхідно збільшувати довжину вибірки.

При цьому зростає обсяг і час обчислення. Останнє обмежено динамікою зміни сигнально-завадової обстановки.

Градієнтний метод являється універсальним методом управління і використовується для адаптивного налаштування вагових коефіцієнтів. Використовуючи градієнтний метод вектор вагових коефіцієнтів в момент і+1 визначається через вектор вагових коефіцієнтів в j-й момент часу у відповідності з рекурентним вираженням:

$$W(j+1) = W(j) - \gamma \cdot \Delta(j), \qquad (2)$$

де γ - скалярна величина, яка визначає розмір кроку підстроювання і яка впливає на стійкість і швидкодію адаптивного пристрою. Після закінчення перехідних процесів

Відповідно до цього методу вектор вагового коефіцієнта повинен змінюватися в напрямку оцінки градієнта середнього квадрата помилки. У цьому випадку вектор вагових коефіцієнтів в (j+1)-й момент буде визначатися через вектор вагових коефіцієнтів в j-й момент відповідно до рекурентним вираження:

$$w(j+1) = w(j) - \gamma' \nabla(j) \qquad (3)$$

де $\nabla(j)$ - вектор градієнта середнього квадрата помилки в j-й момент; $\gamma'$ — скалярна величина, що визначає «розмір» кроку підстроювання та яка впливає на стійкість і швидкодію адаптивного пристрою. Після закінчення перехідних процесів $w(j+1) = w(j)$ й, отже, $\nabla(j) = 0$, що свідчить про оптимальність обчислення вагових коефіцієнтів.

Розмір кроку, обумовлений величиною $\gamma'$, не повинен бути більшим, щоб не «проскочити» екстремум, при цьому з'являється небезпека зациклення. Його небажано вибирати занадто малим, тому що при цьому збільшується час пошуку екстремуму.

Рекурентні методи базуються на рекурентному обертанні матриць при прямому методі обчислення вагових коефіцієнтів. При цьому часові затрати на обертання кореляційної матриці не враховується, із-за цього в сталому режимі рекурентні методи повинні мати велику чутливість до розподілення значень, які належать до її кореляційної матриці вхідних сигналів.

Для отримання оборотної кореляційної матриці використаємо наступний спосіб.

Матрицю завад представимо у вигляді

$$R_n = (I + \gamma * U_n^* * U^T{}_n), \qquad (4)$$

де I –одиниця матриці, γ – константа, $U_n$ – вектор напруги в каналах.

Виконаємо рівність $R_n^{-1} = (I + \varepsilon * U_n^* * U^T{}_n)$.

Для визначення ε перемножимо $R_n$ на $R_n^{-1}$ отримаємо

$$I = I + \varepsilon U_n^* * U_n^T + \gamma U_n^* * U_n^T + \gamma * \varepsilon U_n^* * U_n^T * U_n^* * U_n^T \qquad (5)$$

Розв'язавши рівняння отримаємо

$$R_n^{-1} = I - \frac{\gamma}{1 + \gamma U_n^T * U_n^*} * U_n^T * U_n^* \qquad (6)$$

Цей метод може використовуватися, коли коефіцієнти кореляційних завад в прийомних каналах дорівнює 1 та $\gamma \neq \frac{1}{U_n^T * U_n^*}$

## Висновки

В статті були розглянуті існуючі проблеми в завадостійкості апаратури супутникової навігації. Найбільш перспективним є використання боротьби з завадами застосування адаптивних антенних систем, з використанням різних методів адаптації, серед яких було виділено прямий метод обчислення вагових коефіцієнтів, градієнтні методи визначення вагових коефіцієнтів, рекурентні методи.

## Список літератури


1. *Конин В. В., Заблоцкий М. А., Ковалевский Э. А.* Возможности цифровой обработки сигналов в системах спутниковой радионавигации / Материалы 8-й Международной Крымской Конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь, Украина, 14-17 сентября 1998 г. – Севастополь. -1998. Т. 1, с. 304-306.
2. *Бабак В.П., Конін В.В., Харченко В.П.* Супутникова радіонавігація. - К.: Техніка, 2004. - 328 с.
3. *Гордиенко Д.Н.* Возможности использования адаптивных антенных решеток для повышения помехоустойчивости аппаратуры спутниковых радионавигационных систем // Новости навигации. НЦ «Интернавигация» и РОИН, 2001, N 1.
4. Адаптивная компенсация помех в каналах связи/под ред. *Ю. И. Лосев.* М.: Радио и связь, 1988. - 208с.
5. *В.Слюсар.* Цифровые антенные решетки. Решения задач GPS // Электроника: связь и телекоммуникации, 2009, №1
6. *Скорик Е.Т.* Противодействие спутниковой радионавигационной системе GPS. – Известия вузов. Серия "Радиоэлектроника", 2006, т.49, № 10.
7. *Слюсар В.И.* Цифровые антенные решетки: будущее радиолокации. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2001, № 3.

УДК 621.78:525.35

*В.В. Конін, д. т. н., проф., О.С. Савчук, студентка*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МОДЕЛЬ СИГНАЛУ СИСТЕМИ GALILEO З НОВИМ ТИПОМ МОДУЛЯЦІЇ BOC

*В програмному середовищі MatLab розроблена модель і виконано моделювання характеристик сигналу супутникової системи GALILEO з новим видом модуляції BOC.*

У роботі використовуватимемо меандрові радіосигнали з BOC- модуляцією типів BOC(1/2, 1) і BOC(1, 1).

У статті під терміном «символ псевдовипадкової послідовності (ПВП)» розуміється відеосигнал меандрової форми. Сама ПВП, як звичайно, складається з деякої кількості цих символів з використанням кодових коефіцієнтів, які відображають як символіку коду (наприклад, приймаючи значення +1 або -1), так його тип і характеристики. Терміни «одиночний символ ПВП» і «одиночна ПВП» означають, що розглядаються вирази, що описують відповідно один символ ПВП і один період ПВП.

ПВП мають одиничні амплітуди, тому отримані вирази характеризують нормовані спектри.

Випромінюваний меандровий BOC - сигнал середньоорбітальних СРНС у типовому випадку двійкової фазової маніпуляції зовні має форму запису:

$$s(t-t_0) = Ad(t-t_0)\cos[\omega_0(t-t_0)+\varphi(t)], \quad (1)$$

де $A$ – амплітуда сигналу, $d(t)$ – меандрова ПВП далекомірного коду, що представляє собою позитивні або негативні відеоімпульси одиничної амплітуди й однакової тривалості, які чергуються за певним законом, $\omega_0(t)$ – кругова несуча частота, $\varphi(t)$ – фаза сигналу, $t_0$ – початок відліку.

Меандрова ПВП (МПВП) далекомірного коду $d(t)$ (для інформаційного сигналу) є результатом перемножування, як правило, чотирьох послідовностей: власне ПВП далекомірного коду, додаткового меандрового коливання (специфіка BOC – сигналів), посилок навігаційного повідомлення й посилок синхрокоду для забезпечення тактової синхронізації при функціонуванні. Далі важатимемо, що МПВП $d(t)$ обумовлена власне ПВП далекомірного коду й меандровим коливанням.

Типова МПВП далекомірного коду (модулююча функція BOC – сигналу) $d(t)$ може бути записана у вигляді:

$$d(t-t_0) = g(t-t_0)r(t-t_0), \quad (2)$$

де $g(t)$ – власне ПВП далекомірного коду, що також характерна й для традиційних СРНС; $r(t)$ – меандрове коливання, що відбиває специфіку нового класу сигналів СРНС.

Меандрове коливання $r(t)$ визначається виразом виду [2]:

$$r(t) = sign[\sin\omega_м t], \quad (3)$$

де $\omega_M = 2\pi f_M$ – кругова частота меандрового коливання; $f_м = 1/T_м$ – частота меандрового коливання; $T_м = 2\tau_м$ – період меандрового коливання; $\tau_м$ – тривалість імпульсу меандрового коливання (меандрового імпульсу).

Функція «сигнум» z дорівнює:

$$\operatorname{sign} z = \begin{cases} 1, & z>0; \\ 0, & z=0; \\ -1, & z<0. \end{cases}$$

Видно, що

$$f_м = \frac{1}{2\tau_м}. \tag{4}$$

Вираз ПВП далекомірного коду $g(t)$, що описує один її період, має вигляд [2]

$$g(t-t_0) = \sum_{i=0}^{l-1} \nu_k \,\mathrm{rect}_c[t - i\cdot\tau_c - t_0], \tag{5}$$

де $l$ – кількість символів на періоді ПВП; $i$ = 0, 1, 2,…,($l$–1); $\nu_k$ – кодові коефіцієнти, які утворюють ПВП; rect – функція, яка являє собою імпульс одиничної амплітуди тривалістю $\tau_c$; $\tau_c$ – тривалість символу (елементу) ПВП; $t_0$ – початковий момент часу.

Для реалізації математичної функції rect використаємо функцію вбудовану в Matlab: $\mathrm{rect} = \mathrm{rectpuls}(t, i\cdot 2\cdot\tau_c)$ [1].

Тривалість періоду ПВП дорівнює $T = l\cdot\tau_c$.

Важливі властивості МПВП визначаються двома параметрами: $f_c = 1/\tau_c$ – частота проходження символів ПВП $g(t)$ і $f_м = 1/2\tau_м$ – частота меандрового коливання $r(t)$ [2].

Для порівняльної характеристики типів меандрової модуляції застосовується наступне позначення: BOC ($f_м$, $f_c$). Оскільки на практиці частоти $f_м$, $f_c$ звичайно кратні опорній частоті $f_{оп}$, (зокрема, для систем GPS і Galileo $f_{оп}$ = 1,023 МГц), то часто використовується й трохи інша форма запису для позначення типу меандровой модуляції радіосигналів: BOC(α,β), де $\alpha = f_м / f_{оп}$ і $\beta = f_c / f_{оп}$ [2].

Для кількісної характеристики різних типів BOC – сигналів використовують коефіцієнт кратності меандрових імпульсів $N_м$, що дорівнює кількості імпульсів меандрового коливання $r(t)$, що містяться в меандровому символі $g(t)$, [2]:

$$N_м = \frac{\tau_c}{\tau_м} = \frac{2f_м}{f_c}. \tag{6}$$

На рис. 1 зображені результати моделювання меандрового коливання $r(t)$, *20* символів ПВП далекомірного коду $g(t)$ і МПВП далекомірного коду $d(t)$, що їм відповідають, при коефіцієнті кратності $N_м$=2 (тип меандрової модуляції BOC (1, 1)).

При розрахунках використовуємо первинний код №1 системи Галілео на частоті E1 (компонент E1-B) – оптимізовану псевдовипадкову послідовність $g(t)$[3]. Цей сигнал має такі парметри: *T*=4 мс; *l*=4092; $f_c$=1,023 МГц. [3, 4].

Одиночний символ меандрової ПВП далекомірного коду $d(t)$, тобто меандровий символ має тривалість $\tau_c = N_м\cdot\tau_м$ і з урахуванням співвідношень (2), (3) і (5) може бути описаний виразом виду [2]:

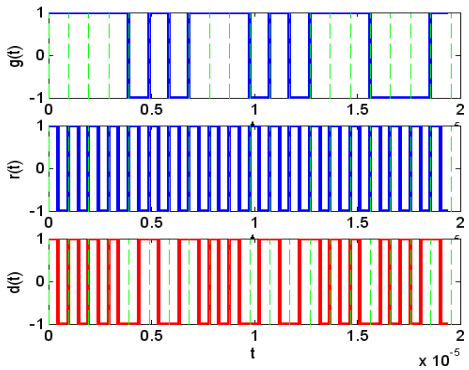



Рис. 1. Меандрове коливання $r(t)$, 20 символів ПВП далекомірного коду $g(t)$, МПВ далекомірного коду $d(t)$

$$\mu_c(t) = \sum_{m=0}^{N_м - 1} (-1)^m rect_м[t - m \cdot \tau_м]. \quad (7)$$

При аналізі виразів (2), (3), (6) і (7) видно, що формула для одиночної МПВП далекомірного коду $d(t)$ різна залежно від того, ціле або нецiле число періодів $T_м$ меандрового коливання $r(t)$ укладається на інтервалі $\tau_c$ (тобто коефіцієнт $N_м$ – парне або непарне число) [2]

$$d(t - t_0) = \sum_{i=0}^{l-1} \upsilon_k \cdot \mu_c(t - i \cdot N_м \cdot \tau_м - t_0), \text{ якщо } N_м \text{ – парне число,} \quad (8)$$

$$d(t - t_0) = \sum_{i=0}^{l-1} (-1)^i \upsilon_k \cdot \mu_c(t - i \cdot N_м \cdot \tau_м - t_0), \text{ якщо } N_м \text{ – непарне число.}$$

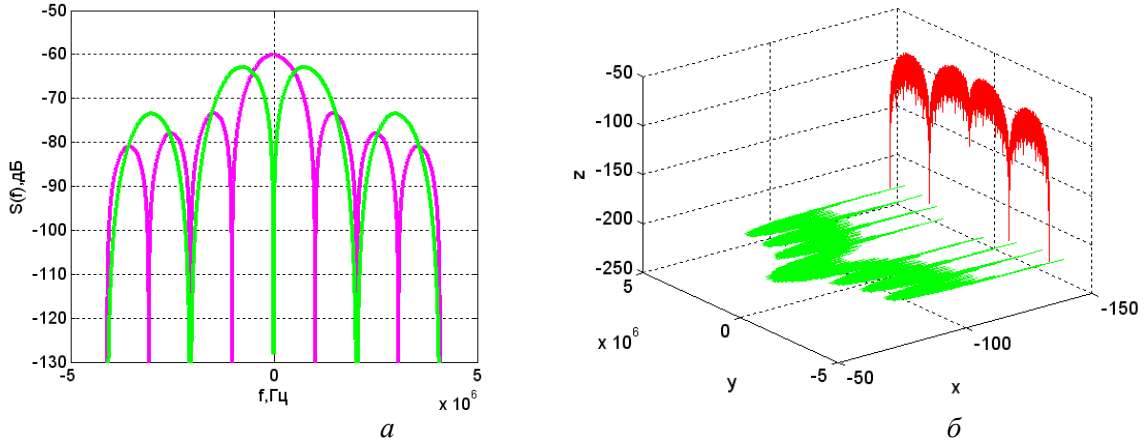
Енергетичний спектр (спектральна щільність потужності) $S(\omega)$ одиночного символу $\mu_c(t)$ меандрової ПВП далекомірного коду є перетворення Фур'є від відповідної кореляційної функції.

Вираз для енергетичного спектру $S(\omega)$ одиночного символу $\mu_c(t)$ меандрової ПВП далекомірного коду при різних значеннях коефіцієнта кратності $N_м$ має вигляд [2]:

$$S(f) = \frac{1}{f_c}\left[\frac{\sin\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\frac{\pi f}{f_c}} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi f}{N_м \cdot f_c}\right)\right] \text{ при } N_м \text{ - парному,} \quad (9)$$

$$S(f) = \frac{1}{f_c}\left[\frac{\cos\left(\frac{\pi f}{f_c}\right)}{\frac{\pi f}{f_c}} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi f}{N_м \cdot f_c}\right)\right] \text{ при } N_м - \text{ непарному.} \quad (10)$$

На рис.2 *а* зображені результати моделювання енергетичних спектрів $S(f)$, розрахованих за допомогою програми Matlab згідно (9, 10) для 2 значень коефіцієнта кратності: $N_м = 1$ і $N_м = 2$.




*а* *б*

Рис. 2. *а* – Графіки енергтичних спектрів, розраховані для 2 значень коефіцієнта кратності: $N_м = 1$ і $N_м = 2$.; *б* – Графіки спектрів двох СРНС – Галілео і GPS

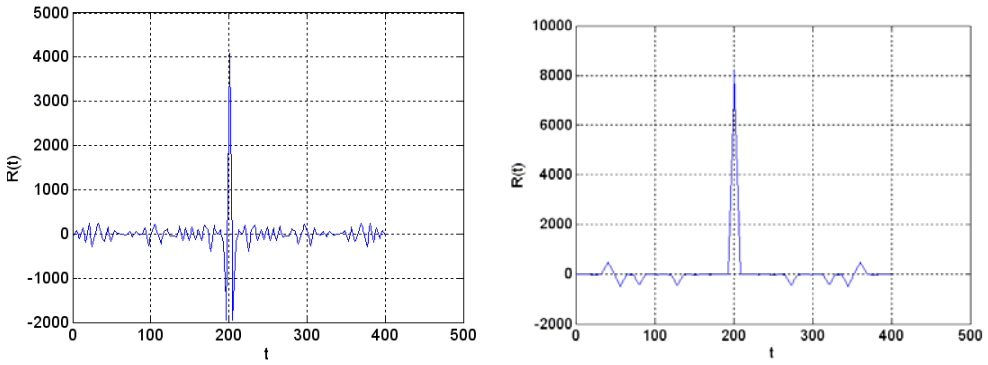
За допомогою функції спектрального аналізу в Matlab y = fft(d) [1], яка обчислює пряме дискретне перетворення Фур'є, отримаємо графіки спектрів для сигналів, двох СРНС – GPS (площина XOY) і Галілео (площина YOZ), в яких застосовується модуляція BOC(1/2, 1) або (BPSK(1)) і BOC(1, 1) відповідно. При розрахунках було прийнято, що в обох системах $f_c$=1,023 МГц, для Галілео довжина коду $l$ = 4092, а для GPS – $l$ = 1023 [3, 4]. На рис. 2 *б* представлені графіки спектрів двох СРНС – Галілео і GPS.

Проаналізуємо кореляційну функцію для вище згаданих двох систем, тобто для 2 типів модуляції BOC(1/2, 1) або (BPSK(1)) і BOC(1, 1). За допомогою функції Matlab R=xcorr(x) [1]

обчислимо автокореляційну функцію МПВП системи Галілео (рис. 3 *а*), системи GPS (рис. 3 *б*) і взаємну кореляційну функцію для цих двох систем (рис. 4).

Аналізуючи дані графіки, можна побачити, що кореляційна функція при модуляції BOC(1,1) – багатопелюсткова (кількість піків дорівнює $2 \cdot N_{м} - 1 = 3$), втричі збільшився кут нахилу прямих, які утворюють основний пік кореляційної функції, порівняно з модуляцією типу BOC(1/2, 1).

З рис. 4 видно, що графік взаємної кореляційної функції ГАЛІЛЕО і GPS не має добре виражених піків, а це означає, що може ефективніше використовуватись частотний спектр в L діапазоні.




*а* *б*

Рис. 3. *а* – Графік автокореляційної функції МПВП системи Галілео (BOC(1,1)); *б* – графік автокореляційної функції ПВП системи GPS (BOC(1/2, 1)).

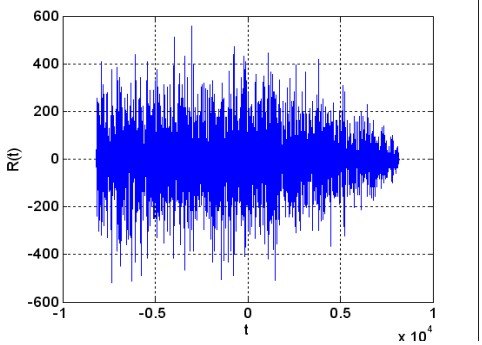



Рис 4. Графік взаємної кореляційної функції сигналів системи Галілео і GPS.

## Висновки

Отримана модель сигналу супутникової навігаційної системи GALILEO з новим видом BOC – модуляції. Модель дозволяє досліджувати характеристики сигналу GALILEO: автокореляційну функцію, спектр для будь-якого коду GALILEO, а також оцінювати взаємний вплив сигналів GALILEO і GPS.

## Список літератури


1. *Сигриенко А. Б.* Цифровая обработка сигналов. – СПб.: «Питер», 2002. – 608 с.
2. *Ярлыков М. С.* Меандровые радиосигналы (BOC – сигналы) в спутниковых радионавигационных системах нового поколения. – М.: Новости навигации, 2007, № 3.
3. Galileo Open Service. Signal In Space. Interface Control Document . OS SIS ICD, Draft 1. «European Space Agency», 2008. – 166 p.
4. *Jean-Luc Issler, Gunter W. Hein, Jeremie Godet, Jean-Christophe Martin, Philippe Erhard, Rafael Lucas-Rodriguez, Tony Pratt.* Система Galileo. Структура частот и сигналов системы спутникового позиционирования. Пер.: «Невгеоком», 2003.

УДК 621.396:621.372

*О.С. Погурельський, В.В. Конін, д.т.н., проф.*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ ВИЗНАЧЕНЬ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СИСТЕМ GPS ТА ГЛОНАСС

*Аналізується ефективність розв'язання навігаційної задачі за алгоритмом спільної обробки даних, що поступають від систем GPS і ГЛОНАСС. Зазначаються умови, за яких приймач з можливістю спільної обробки даних від різних супутникових навігаційних систем матиме переваги над "односистемними".*

На сучасному етапі супутникові радіонавігаційні системи є високотехнологічною галуззю із найбільшими темпами розвитку. Відбувається зростання кількості навігаційних пристроїв і їх проникнення у найрізноманітніші галузі застосування. Разом із тим, за інформацією оприлюдненою бюджетно-контрольним управлінням США, а згодом підтвердженою головним конструктором системи GPS Бредом Паркінсоном, вже у 2010 році число працездатних космічних апаратів цієї системи впаде нижче критичного рівня. Існує ймовірність, що кількість працездатних GPS-супутників може виявитись меншою за 24. Як наслідок, найбільш розвинена на сьогоднішній день супутникова радіонавігаційна система не зможе гарантувати користувачам глобальність та безперебійність постачання навігаційних послуг.

В той же час система ГЛОНАСС, підпорядкована Міністерству оборони Російської Федерації, продовжує розгортання супутникового угруповування і модернізацію вже виведених на орбіту навігаційних космічних апаратів. Карта інтегральної доступності системи ГЛОНАСС на сайті інформаційно-аналітичного центра Роскосмоса свідчить про стабільність рівня параметра середньодобової доступності навігації за сигналами системи як на території Росії (на рівні 96%), так в світі вцілому (85%). На противагу GPS можливості ГЛОНАСС зростають, і найближчій перспективі складатимуть їм суттєву конкуренцію.

З точки зору користувачів, яких цікавить можливість отримання якісних послуг супутникової навігації протягом наступних кількох років, а також їх незалежність від політичних і економічних чинників, оптимальним варіантом виглядає не вибір якоїсь конкретної системи, а можливість роботи з супутниковими сузір'ями різних існуючих систем. Причому можливість одночасної обробки даних від супутників GPS, ГЛОНАСС, а в перспективі і GALILEO, здатна компесувати окремі недоліки, пов'язані з неповною комплектацією космічного сегменту, короткотривалими відмовами окремої системи, навмисним загрубленням точності.

На сьогоднішній день на ринку навігаційних приймачів існує достатня кількість пристроїв, що поєднують в собі функції GPS та ГЛОНАСС приймача, тобто приймають і обробляють сигнали, як від однієї, так і від іншої системи. В переважній більшості користувачу необхідно самому зробити вибір, за сигналами якої системи він бажає отримати розв'язок навігаційної задачі. Приймачі з можливістю одночасної обробки навігаційної інформації від обох систем і винайденням спільного розв'язку місцеположення наразі складають одиниці. Пошук в літературних джерелах математичного обгрунтування алгоритму спільної обробки сигналів від супутників різних систем показує явну недостатність інформації з цього питання. Частково це пояснюється комерційною зацікавленістю розробників навігаційної апаратури в дослідженнях подібного спрямування. В той же час, аналіз загальних принципів побудови та функціонування супутникових навігаційних систем GPS і ГЛОНАСС дозволяє припутити можливість спілної обробки навігаційної інформації від обох цих систем.

При розрахунку місцеположення навігаційного приймача найбільш поширеним є псевдовіддалемірний метод.

В основі методу лежить рівняння:

$$PR_i^{изм.} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} + h_n + \Delta_i, \qquad (1)$$

де

$x, y, z$ – координати, які необхідно визначити,

$x_i, y_i, z_i$ – координати навігаційного супутника з номером $i$,

$PR_i^{изм.}$ - виміряна псевд віддаль до навігаційного супутника з номером $i$,

$h_n$ – помилка вимірювання псевдовіддалі внаслідок розходження шкал часу супутника та приймача.

$\Delta_i$ – похибки визначення псевдо віддалі до і-го супутника внаслідок похибок прогнозу ефемерид, похибок частотно-ефемеридного забезпечення, похибок швидкості розповсюдження радіохвиль в тропосфері і іоносфері на трасах «і-тий навігаційний супутник-користувач», похибок через багатопроменеве розповсюдження сигналів навігаційних супутників в місці прийому, шумів приймального каналу апаратури користувача та похибок внаслідок природних та навмисних завад.

В рівнянні (1) присутні чотири невідомих, які необхідно визначити: $x, y, z, h_n$. Для обрахунку координат $x, y, z$ та помилки $h_n$, необхідно мати вимірювання псевдовіддалей не менш ніж до чотирьох супутників. При одномоментних вимірюваннях $h_n$ для всіх вимірювань однакова і при наявності чотирьох нелінійних рівнянь (1) може бути отриманий точний розв'язок.

Якщо навігаційний приймач виконує вимірювання псевдовіддалей по системам GPS і ГЛОНАСС, що працюють в різних системних шкалах часу, то додається ще одна невідома величина – помилка вимірювань псевдовіддалі внаслідок розходження шкал часу супутника ГЛОНАСС і приймача ($h_k$). Для визначення координат $x, y, z$ і помилки $h_k$ рівняння (1) приймає вигляд:

$$PR_j^{изм.} = \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2} + h_k + \Delta_j, \qquad (2)$$

де

$x, y, z$ – координати, які необхідно визначити;

$x_j, y_j, z_j$– координати навігаційного супутника ГЛОНАСС з номером $j$,

$PR_j^{изм.}$ - виміряна псевдовіддаль до навігаційного супутника ГЛОНАСС з номером $j$,

$h_k$ – помилка вимірювань псевдовіддалі внаслідок розходження шкал часу супутника ГЛОНАСС і приймача,

$\Delta_i$ – похибки визначення псевдо віддалі до і-го супутника внаслідок похибок прогнозу ефемерид, похибок частотно-ефемеридного забезпечення, похибок швидкості розповсюдження радіохвиль в тропосфері і іоносфері на трасах «і-тий навігаційний супутник-користувач», похибок через багатопроменеве розповсюдження сигналів навігаційних супутників в місці прийому, шумів приймального каналу апаратури користувача та похибок внаслідок природних та навмисних завад.

Таким чином, якщо розрахунок координат користувача виконується із застосуванням вимірювань псевдовіддалей до супутників GPS і ГЛОНАСС необхідно визначати п'ять невыдомих: $x, y, z, h_n, h_k$. Для визначення п'яти невыдомих необхыдно мати мінімум п'ять рівнянь типу (1, 2). Причому ці рівняння мають відноситись до різних супутникових систем в будь-яких кількісних комбінаціях, наприклад: 4 GPS + 1 ГЛОНАСС, 3 GPS + 2 ГЛОНАСС, 2 GPS + 3 ГЛОНАСС, 1 GPS + 4 ГЛОНАСС.

Оскільки в зоні видимості навігаційного приймача може знаходитись від 6 до 11 супутників GPS і стільки ж супутників ГЛОНАСС (при повному розгортанні ГЛОНАСС), то розрахунок координат користувача доцільно виконувати при використанні вимірювань псевдовіддалей до усіх видимих супутників.

Запропонований метод було реалізовано в програмному середовищі MatLab у вигляді програми. Окремими функціями створеної програми виконуються:

- декодування ефемерид супутників системи GPS;

- декодування ефемерид супутників системи ГЛОНАСС;
- зчитування виміряної приймачем псевдовіддалі до супутників GPS;
- зчитування виміряної приймачем псевдовіддалі до супутників GPS;
- розмноження отриманих ефемерид на час визначення псевдовіддалі до видимих супутників обох систем;
- розв'язання навігаційної задачі окремо за даними системи GPS;
- розв'язання навігаційної задачі окремо за даними системи ГЛОНАСС;
- розв'язання навігаційної задачі у спільному алгоритмі.

Отримані результати розв'язання навігаційної задачі порівнювались із апріорі відомим положенням антени приймача, який використовувався для запису навігаційних повідомлень GPS та ГЛОНАСС. Накоплена за інтервал виконання експерименту сферична помилка виводилась на екран у вигляді графіків зміни помилки в часі окремо для випадків: розв'язання навігаційної задачі за даними системи GPS, розв'язання навігаційної задачі за даними системи ГЛОНАСС, результат обробки у спільному алгоритмі. Визначались математичне очікування помилки визначення місцеположення та середньоквадратичне відхилення.




Рис. 1. Видимі навігаційні супутники на момент запису даних

На рис.1 зафіксовано розташування видимих супутників на момент проведення запису ефемерид та виміряних псевдовіддалей. Супутники з номерами 1-32 відносяться до системи GPS, з номерами 33-64 до системи ГЛОНАСС.

Графічні результати роботи програми з обробки записаних даних для інтервалу у 220 секунд приведені на рис.2.

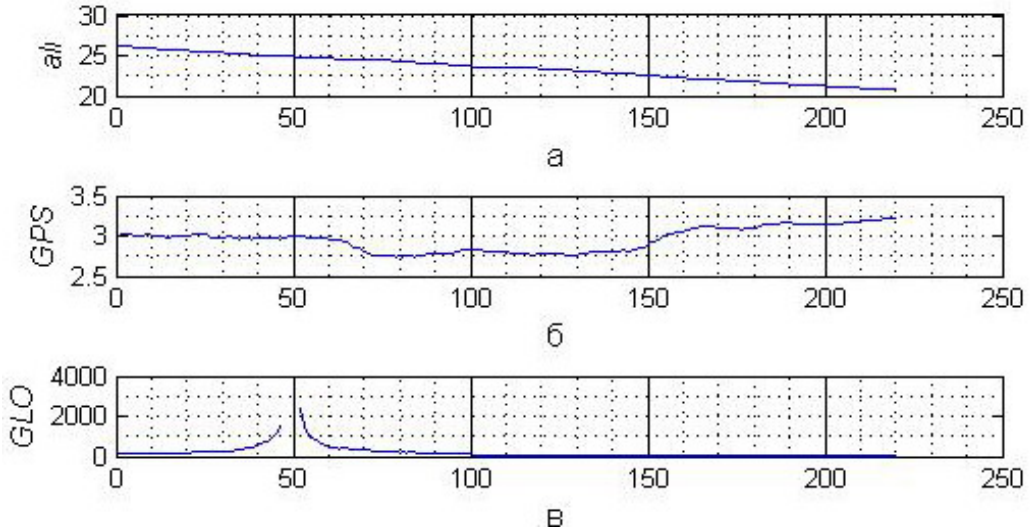



Рис.2. Сферична помилка визначення місцеположення для 220 відліків
а) при спільній обробці даних від систем GPS та ГЛОНАСС
б) при обробці даних окремо від системи GPS
в) при обробці даних окремо від системи ГЛОНАСС

Незважаючи на те, що точнісні характеристики розв'язання навігаційної задачі при спільній обробці даних виявились гіршими, ніж при окремій обробці даних від систем GPS та ГЛОНАСС, необхідно відзначити наявність короткотривалого інтервалу часу, коли розрахунок в системі ГЛОНАСС був взагалі неможливий внаслідок відсутності даних від одного з чотирьох видимих супутників. Цей момент на графіку (рис.2в) відобразився розривом розрахунку помилки місцевизначення. Проте на графіку спільної обробки цей стрибок погіршення точності і розрив відсутні (рис.2а), тобто короткотривала відсутність від одного із задіяних супутників ГЛОНАСС успішно компенсувалась доданими дев'ятьма супутниками GPS.

В табл.1 приведено результати розрахунків математичного очікування та середньоквадратичного відхилення помилки визначення місцеположення для різних кількісних комбінацій навігаційних супутників, виміряні псевдовіддалі до яких використовувались у розрахунках.

*Таблиця 1.*

| Комбінація супутників | 9 GPS | 4 ГЛОНАСС | 9 GPS + 4 ГЛОНАСС | 4 GPS + 4 ГЛОНАСС | 6 GPS + 4 ГЛОНАСС | 3 GPS + 3 ГЛОНАСС | 9 GPS + 1 ГЛОНАСС |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m, м | 2,95 | 17,63 | 23,47 | 20,09 | 9,13 | 87,54 | 6,77 |
| σ, м | 0,27 | 2,12 | 2,69 | 2,34 | 1,08 | 8,25 | 0,54 |

На рис.3-5 приведені графіки зміни сферичної похибки визначення місцеположення при різних комбінаціях використаних супутників.

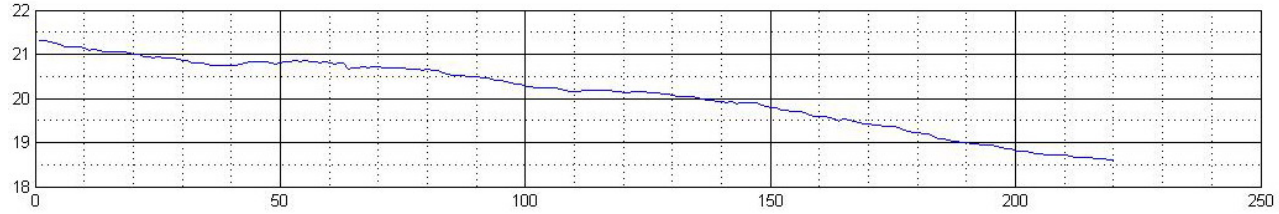



Рис.3 Сферична помилка визначення місцеположення для сузір'я 4GPS+4ГЛОНАСС

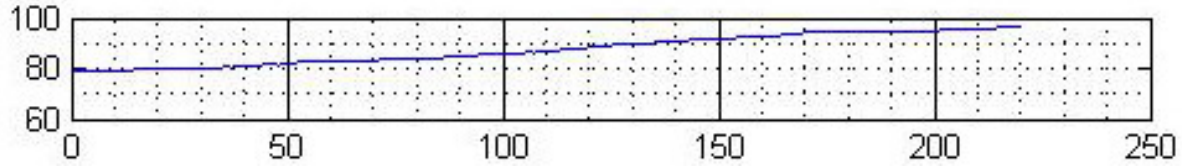



Рис.4 Сферична помилка визначення місцеположення для сузір'я 3GPS+3ГЛОНАСС

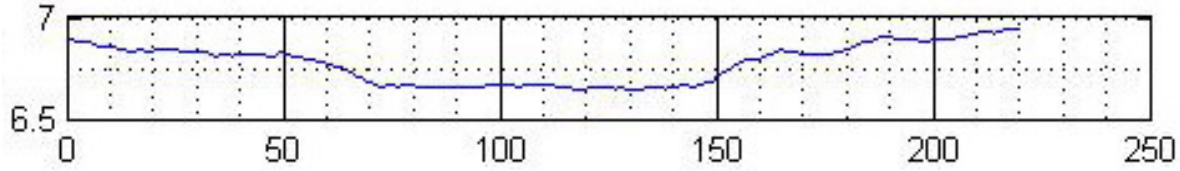



Рис.5 Сферична помилка визначення місцеположення для сузір'я 9GPS+1ГЛОНАСС

## Висновки

Результати роботи програми зі спільної обробки даних підтвердили можливість додавання в разі необхідності до сузір'я супутників однієї системи додаткових супутників із іншої. Виграш по точності при цьому не спостерігався, проте збільшення загального числа супутників, які можуть бути використані, підвищує цілісність послуги супутникової навігації. Так у випадку доступності лише 3-х супутників GPS розв'язання навігаційної задачі неможливе, а при додаванні до них 2-х чи 3-х супутників ГЛОНАСС , спільний алгоритм обробки даних цю задачу розв'язати спроможний.

Існуючий на сьогодні стан, коли послуги супутникової навігації в глобальному масштабі можна одержувати від паралельно функціонуючих систем GPS, ГЛОНАСС та в перспективі GALILEO, доцільно використовувати заради отримання більш високих якісних показників сервісу вцілому.

УДК: 621.396.967.1

*П.Н. Мележик, доктор ф.-м. наук, член-корреспондент НАН Украины,*
*С.Д. Андренко, кандидат ф.-м. наук, Ю.Б. Сидоренко, кандидат ф.-м. наук,*
*С.А. Провалов, кандидат ф.-м. наук, В.Б. Разсказовский, доктор технических наук,*
*Н.Г. Резниченко, В.А. Зуйков, М.Г. Балан, А.В. Варавин*
*(Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Украина),*
*М.В. Колисниченко, Ю.Н. Муськин, кандидат технических наук*
*( ОАО «НПП «Сатурн», Украина)*

# РАДИОЛОКАЦИОННЫЙ СЕНСОР ДЛЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ НАЗЕМНОГО ДВИЖЕНИЯ В АЭРОПОРТАХ

*Приводятся основные сведения об особенностях технических решений, характеристиках и о результатах испытаний экспериментального образца полупроводникового радиолокацион-ного сенсора Ка-диапазона с когерентной обработкой сигнала, предназначенного для использования в качестве одного из датчиков в системе наземного мониторинга территорий аэропортов. Разработка и испытания выполнены ИРЭ им. А.Я. Усикова НАН Украины и ОАО «НПП«Сатурн».*

## Введение

Безопасность и эффективность воздушных перевозок в их наземной фазе в значительной мере определяется полнотой информации об обстановке на территории аэропорта, в первую очередь, о местонахождении и перемещениях воздушных судов и транспортных средств различного назначения. В соответствии с требованиями ICAO все крупные современные аэропорты должны быть оборудованы системами автоматизированного управления наземным движением (A-SMGCS – Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems в обозначении ICAO), входной информацией для которых являются данные, получаемые от датчиков разных типов, в том числе от вторичных и первичных радиолокаторов, которые являются обязательными. Используемые в настоящее время в крупных аэропортах радиолокаторы обзора летного поля, например, РЛС ОЛП «Обзор» и «Обзор-2» и близкие к ним по характеристикам зарубежные радиолокаторы типа ASDE (Airport Surface Detection Equipment), (см., например, [1, 2, 3]) по ряду параметров не удовлетворяют требованиям к радиолокационным датчикам для систем A-SMGCS [3]. Это послужило стимулом к разработке новых компактных, экономичных радиолокаторов миллиметрового диапазона радиоволн, имеющих небольшую по сравнению с радарами класса ASDE излучаемую мощность и обеспечивающих, при дальности действия каждого в единицы километров, обзор всей зоны контроля за счет объединения нескольких таких датчиков в сеть. Одной из первых работ по разработке такого радиолокационного датчика является [4], где убедительно показаны преимущества миллиметрового диапазона и описан один из первых разработанных и испытанных вариантов такого устройства, названного авторами «минирадаром». В последующих публикациях [5,6] описаны модернизированные варианты минирадара и возможности его практического применения. В 2008 г. появились сообщения о разработке и испытаниях радиолокационного комплекса обзора летного поля «Атлантика» (Россия, С.-Петербург, ОАО “Экспериментальный завод ХК «Ленинец»[7]), в состав которого входит РЛС Ка-диапазона.

Все упомянутые выше радиолокаторы построены на классической схеме некогерентных импульсных радиолокаторов, в которых в качестве источников зондирующих сигналов используются электровакуумные генераторы, обычно магнетроны, с импульсной мощностью примерно до 10 кВт. Это не позволяет осуществить в них эффективную селекцию движущихся целей и оценить скорости их движения, что является одним из требований A-SMGCS. Нами обоснована возможность создания, принципы построения и реализован полностью полупроводниковый импульсный радиолокатор Ка-диапазона с

когерентной обработкой сигналов, имеющий ряд преимуществ перед известными, в частности, позволяющий использовать доплеровскую селекцию целей и оценивание их скорости.

**Основные принципы построения и характеристики радиолокационного сенсора**

Результаты исследований по распространению, рассеянию миллиметровых волн [8], опыт разработки радиолокационных устройств и использование современной элементной базы этого диапазона, в первую очередь, полупроводниковых передающих и приемных устройств, обеспечивающих необходимый энергопотенциал, позволили создать в Ка-диапазоне радиолокационное устройство с характеристиками, близкими к требуемым для сенсора системы A-SMGCS. При этом ключевым моментом являлась возможность реализации в этом диапазоне когерентного режима работы, обеспечивающего, во-первых, когерентное накопление пачки отраженных целями импульсов и, благодаря этому, существенное, более чем в 10 раз, снижение требований к излучаемой мощности, во-вторых, осуществление автоматического обнаружения движущихся целей и оценку их скорости по доплеровскому смещению частоты. Выбор Ка-диапазона был компромиссным между стремлением, с одной стороны, уменьшить за счет укорочения длины волны размеры антенны, а с другой, снизить негативное влияние осадков (поглощение и маскирующие отражения) по сравнению с более коротковолновыми диапазонами, в частности, с W-диапазоном. Подробно аргументы по выбору диапазона волн изложены в [9]. Функциональная схема радиолокационного сенсора типична для радиолокаторов с абсолютной когерентностью, в которых несущая, промежуточная и частота повторения формируются из колебаний высокостабильного кварцованного задающего генератора, а обработка сигналов после фазового (синхронного) детектора осуществляется цифровыми устройствами. Полупроводниковый приемо-передатчик разработан и изготовлен ОАО «НПП «Сатурн» специально для создаваемого сенсора на основе разработок, выполненных этим предприятием в предшествующие годы; один из вариантов этого устройства описан в [10].

Оригинальной разработкой Института радиофизики и электроники им.А.Я.Усикова НАН Украины является так называемая «планарная антенна», принцип действия которой состоит в преобразовании поверхностной волны диэлектрического волновода в пространственные при взаимодействии с периодической проводящей структурой. Апертура антенны имеет прямоугольную форму, а ее толщина составляет единицы сантиметров.

Основные технические характеристики созданного радиолокационного сенсора следующие:

- несущая частота 36 ГГц;
- частота повторения 20 кГц;
- длительность импульса 100 нс;
- импульсная мощность около 20 Вт;
- коэффициент шума приемника < 5 дБ;
- промежуточная частота 9 ГГц;
- ширина диаграммы направленности по половине мощности:
  - по азимуту $0{,}25^0$;
  - в вертикальной плоскости около $4^0$;
- скорость обзора пространства 0,25 об/с;
- потребляемая мощность < 1 кВт;
- масса сенсора < 150 кг;
- необходимая высота установки антенны 5÷10 м.

При таких параметрах расчетная дальность обнаружения целей с эффективной поверхностью рассеяния 1 $м^2$ (вероятность обнаружения 0,9, вероятность ложной тревоги $10^{-6}$) составляет в отсутствие осадков 5 км, в дожде интенсивностью 16 мм/час не менее 2 км. Общий вид радиолокационного сенсора приведен на рис.1.

## Испытания сенсора

Испытания сенсора в режиме радиолокационного наблюдения целей состояли из нескольких этапов. На первом путем регистрации отраженных целями сигналов от одиночных известных объектов (эталонные отражатели, автомашина, человек) в режиме наблюдения фиксированного участка местности при неподвижном луче оценивались потенциальные возможности устройства. В частности, по флуктуациям сигнала, отраженного от неподвижных точечных объектов оценивались амплитудные и фазовые флуктуации приемо-передающего тракта. По результатам измерений уровень этих флуктуаций, в которых преобладающую роль играли фазовые шумы, составил около 30 дБ по отношению к уровню несущего сигнала, что должно обеспечить подавление отражений от неподвижных объектов также примерно на 30 дБ. Наблюдение отраженных сигналов от движущихся по участку местности на дистанции около 2 км от РЛС автомашины и человека показали близость экспериментальных результатов к проектным. Пример записи сигнала с выхода фазового детектора, отраженного от автомашины, пересекающей импульсный объект в радиальном к РЛС направлении со скоростью около 40 км/ч, приведен на рис.2.

Заключительный этап испытаний состоял в радиолокационном наблюдении местности, охватывающей участки городской застройки и пригородной зоны при установке радиолокатора на крыше производственного здания высотой около 24 м, а также при работе на территории заводского аэродрома. В последнем случае высота антенны радиолокатора составляла 6 м над грунтом, а его позиция находилась в конце взлетно-посадочной полосы на расстоянии примерно 400 м от нее.

На участках пригородной зоны, не затененных строениями и лесопосадками, на дальностях до 3 км четко наблюдались отражения от автомобилей, выделяющихся на фоне местности цветом меток, соответствующим их радиальным скоростям.

Во время опытов на аэродроме в качестве объектов наблюдения с известными параметрами движения использовались автомашина (автобус) и человек; их движение, в основном, осуществлялось по вспомогательным грунтовым дорогам. В нескольких опытах наблюдались взлет, приземление и маневрирование самолетов АН-12 и АН-140. Для последнего случая изображение на дисплее, полученное путем наложения кадров, показано на рис.3. Смена цвета метки происходила в соответствии с изменением радиальной составляющей скорости вследствие изменения угла между направлениями движения цели и ее облучения на разных участках маршрута.



Рисунок 1

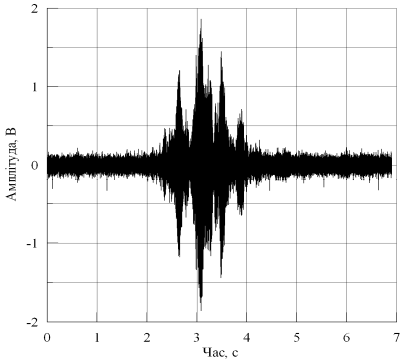



Рисунок 2

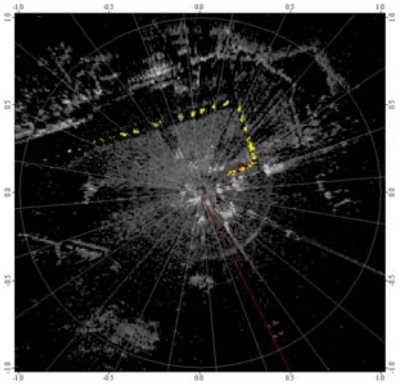


Рисунок 3

## Задачи дальнейших исследований и разработок

Результаты испытаний позволяют сформулировать следующие задачи, которые предлагается решать в процессе усовершенствования радиолокационного сенсора.

а) Проработать варианты повышения разрешающей способности по дальности и скорости обзора пространства

б) Экспериментально уточнить реально достигнутые характеристики обнаружения движущихся объектов на фоне отражений от неподвижных, подавление за счет доплеровской фильтрации маскирующих помех от осадков.

в) Усовершенствование отдельных конструкций и схемотехнических решений.

## Выводы

В результате проведенной разработки создан и испытан радиолокационный сенсор, имеющий за счет когерентной обработки сигналов ряд преимуществ по сравнению с известными, в частности, позволяющий осуществлять автоматическую селекцию движущихся объектов и оценить их скорости. При использовании его в качестве одного из датчиков многосенсорной системы A-SMGCS повысится ее эффективность. На небольших аэродромах, не оборудованных A-SMGCS, сеть из нескольких радиолокационных сенсоров предлагаемого типа может полностью обеспечить функции наземного мониторинга и управления движением (Surface Monitoring and Ground Control – SMGCS), а также предупреждения о несанкционированном появлении объектов в контролируемой зоне. Модификации разработанной когерентной полупроводниковой радиолокационной станции, отличия которых от представленной в докладе могут заключаться, в основном, в характеристиках антенны, параметрах зондирующих сигналов и способах отображения информации, могут быть использованы для радиолокационного контроля за акваториями портов, морских добывающих платформ, транспортных стоянок. За счет когерентной обработки сигналов при этих применениях они будут иметь преимущества по сравнению с предлагаемой для выполнения аналогичных функций радиолокационной станцией «Атлантика-Т» [7].

## Список литературы


1. *C.E.Schwab*. Airport surface detection equipment.-Proc.of IEEE, vol.73, №2, 1985, pp.290-300.

2. *C.A.Vertua*. Two-Sensor Precision Aircraft and Vehicle Positioning for safe Segment Occupancy Control System.-Proc.of ESAV'08 – September 3-5 – Capri, Italy, pp.162-167.

3. *K.Lukin, G.Galati, G.Pavan*. Novel Concepts for Surface Movement Radar Design. – Proc.of ESAV'08 – September 3-5 – Capri, Italy, pp.120-125.

4. *M.Ferri, G.Galati, M.Naldi*. A Novel W – band Radar for Airport Traffic Monitoring: Implementation, First Operational Results, Perspectives. – MSMW'2001 Symp. Proc.,Kharkov, Ukraine, June 4-9, 2001, pp.27-32.

5. *G.Galati, M.Ferri, M.Leonardi, P.Nagaro*. Pre-Operational Evaluation of a Prototype A-SMGCS Using High Resolution Surface Movement Radar: Main Results and Lesson Learn.- Proc.IRS'2004, Warszawa, Poland, May 19-21, 2004, pp.329-334.

6. *G.Galati, P.Mogaro, M.Leonardi, A.Cavallin*. Data Extraction in High Resolution Surface Movement Radar bor A-SMGCS.- Proc. IRS'2004, Warszawa, Poland, May 19-21, 2004, pp.245-250.

7. Радиолокационный комплекс обзора летного поля.- (РЛК ОЛП «Атлантика») www.jscez.spb.ru/products/radio

8. *Кулемин Г.П., Разсказовский В.Б.* Рассеяние миллиметровых радиоволн поверхностью Земли под малыми углами. – К.: Наукова думка, 1987. - 232 с.

9. *Евдокимов А.П., Комяк В.А., Мележик П.Н., Разсказовский В.Б., Чмиль В.М.* Когерентный радиолокатор миллиметрового диапазона для обзора летного поля.- Прикладная радиоэлектроника, 2003, том 2, №1, с.10-18.

10. *Зуйков В.А., Клочко Г.И., Колисниченко М.В., Потиенко В.П., Черний Б.С.* Приемно-передающий радиолокационный модуль миллиметрового диапазона длин волн.- Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2003, №3, с.15-18.

УДК 621. 396: 621. 372

*В.П. Медведев, доктор технических наук, Л.А. Конина*
*(ГП Центральный НИИ навигации и управления, Украина),*
*В.В. Конин, доктор технических наук (НАУ, Украина)*

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРАЕКТОРИИ И ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

*Исследуются параметры движения объекта, полученные методом пассивной локации при наличии шумов.*

**Постановка задачи.** Имеется движущийся объект и платформа, которая пеленгует объект. Необходимо, методом пассивной локации, определить параметры движения запеленгованного объекта - курс, скорость, положение. Предполагаем, что объект движется равномерно и прямолинейно. Пассивный локатор установлен на платформе, координаты, скорость, текущее время которой известны. При этом дисперсия определения углов пеленга пассивным локатором не превышает $0.4^2$ градус$^2$. Эту задачу можно решить, измерив 4 пеленга на объект. По первым трем пеленгам определяется курс запеленгованного объекта. По четвертому пеленгу определяются координаты, скорость и расстояние до объекта. Рассмотрим 2 варианта решения задачи: без учета дисперсии в измерении пеленгов и с учетом дисперсии.

**Решение задачи в условиях идеальных измерений** [1]. Алгоритм решения проиллюстрирован на рис. 1.

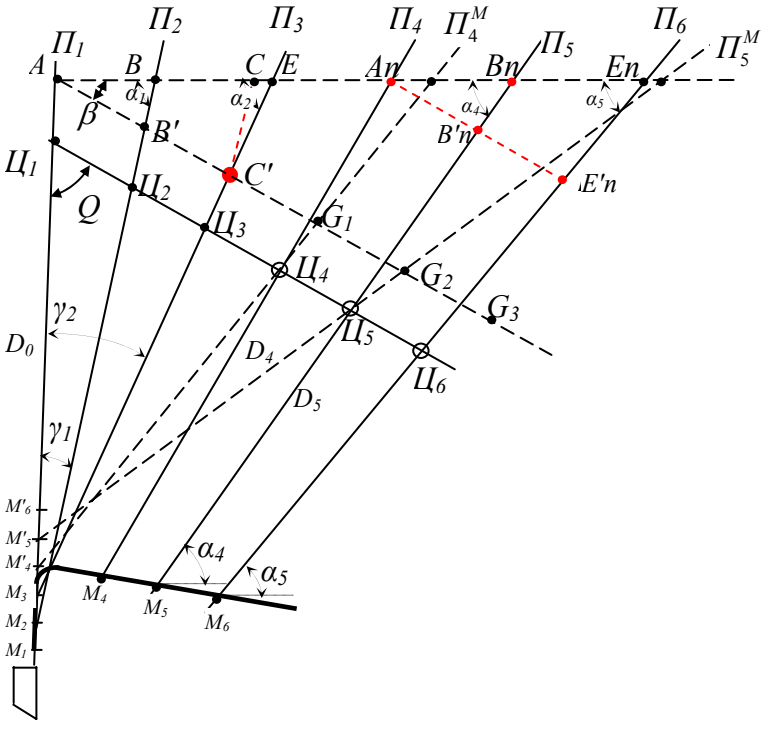



Рис. 1. Иллюстрация алгоритма определения параметров движения объекта в условиях идеальных измерений

На рис. 1 обозначено: $M_1,...M_6$- положение пассивного локатора на платформе (координаты платформы, через заданные промежутки времени); $M_i П_i$ – истинные пеленги (сплошные линии); $M_4 П_4^M$, $M_5 П_5^M$ – мнимые пеленги (пунктирные линии); $A$ – априорно

заданное положение объекта; $AE_n$- вспомогательная прямая; $AG_3$- прямая параллельная направлению движения объекта; $Ц_1Ц_6$ – истинная траектория движения объекта.

Для определения параметров движения объекта используется метод фиктивных пеленгов. Сущность определения параметров движения объекта в условиях идеальных измерений состоит в следующем. После того, как был запеленгован объект, платформа движется в направлении первого пеленга и снимает еще 2 пеленга. По полученным трем пеленгам определяем курс объекта. Для этого устанавливаем априорное расстояние до объекта в точке $A$ и строим перпендикуляр ($AE_n$) к первому пеленгу в точке $A$. Ищем точки пересечения пеленгов с прямой $AE_n$ и из полученных треугольников $ABB'$ и $AEC'$ находим угол наклона траектории объекта $\beta$. Строим фиктивную траекторию движения объекта ($AB'C'$), параллельную истинной траектории. Обозначим $c_1 = AB$, $c_2 = AE$

$\alpha_1 = 90^o - \gamma_1$, где $\gamma_1$ -угол между направлением движения платформы в начальный момент($П_1$) и направлением на объект в момент $П_2$;

$\alpha_2 = 90^o - \gamma_2$, где $\gamma_2$ -угол между направлением движения платформы а начальный момент($П_1$) и направлением на объект в момент $П_3$;

$\beta$ - угол между прямой $AE$ и траекторией объекта $AB'C'$.

$Q$ - угол наклона мнимой траектории объекта, равный (90º- $\beta$ ).

Можно показать, что $Q$ определяется по формулам (учитывая, что $AB' = B'C'$):

$$tg(\beta) = \frac{c_2 * \sin(\alpha_2) * \sin(\alpha_1) - 2 * c_1 * \sin(\alpha_1) * \sin(\alpha_2)}{2 * c_1 * \sin(\alpha_1) * \cos(\alpha_2) - c_2 * \sin(\alpha_2) * \cos(\alpha_1)}, \quad (1)$$

$$\beta = arctg(tg(\beta)), \quad (2)$$

$$Q = \pi - \beta. \quad (3)$$

При равномерном движении объект за равные интервалы времени проходит равные отрезки пути. На линии истинной траектории объекта ($Ц_1 \ldots Ц_6, \ldots$), которая параллельна мнимой траектории его движения ($AB'C'...$), объект будет проходить равные отрезки пути. Так, если мы пеленгуем объект три раза, через равные интервалы времени, то отрезок $AB'$ равен отрезку $B'C'$ (рис. 1). Это утверждение справедливо, если пеленгование производится из одной точки, когда платформа стоит, или из близко расположенных точек, когда платформа движется с небольшой скоростью.

Для определения местоположения пеленгуемого объекта после третьего пеленга платформа поворачивает в сторону перпендикулярно 2 пеленгу и увеличивает скорость (точка $M_4$ на рис. 1). Измеряется пеленг на объект (линия $M_4П_4$). Кроме того, строится мнимый пеленг $M_4^{'} \; П_4^M$, который получился бы, если бы платформа продолжала двигаться в направлении первого пеленга, не меняя первоначальной скорости. Тогда пеленг проходит через точку $G_1$, которая получится, если на продолжении линии $AB'C'$ отложить отрезок, равный расстоянию, проходимому объектом за время между пеленгами ($AB'$). На пересечении пеленга $M_4П_4$ и мнимого пеленга $M_4^{'} \; П_4^M$ определяется местоположение объекта $Ц_4$. Далее, если есть необходимость, измеряются пеленги $M_5П_5$ … $M_iП_i$, и в точках пересечения с соответствующими мнимыми пеленгами определяются координаты пеленгуемого объекта в точках $Ц_5$, $Ц_6$… .

Изложенный алгоритм дает высокую точность определения координат объекта при идеальных (без шумов) измерениях пеленгов. На рис. 2 изображен пример реализации алгоритма в среде MatLab без учета шумов. Для этой модели предполагаемое местоположение цели от пеленгатора выбрано 50 км, рассчитанная точка старта получилась на расстоянии 30 км, погрешность определения координат траектории меньше десятков метров после 5 пеленга. При наличии погрешностей в измерении пеленгов (сигма равна 0.4 градуса) изложенный алгоритм дает большие погрешности, поэтому необходимо принимать

меры для сглаживания измеренных пеленгов. Шумы пеленгов вводятся с помощью генератора случайных чисел, распределенных по нормальному закону со среднеквадратичным отклонением 0.4.

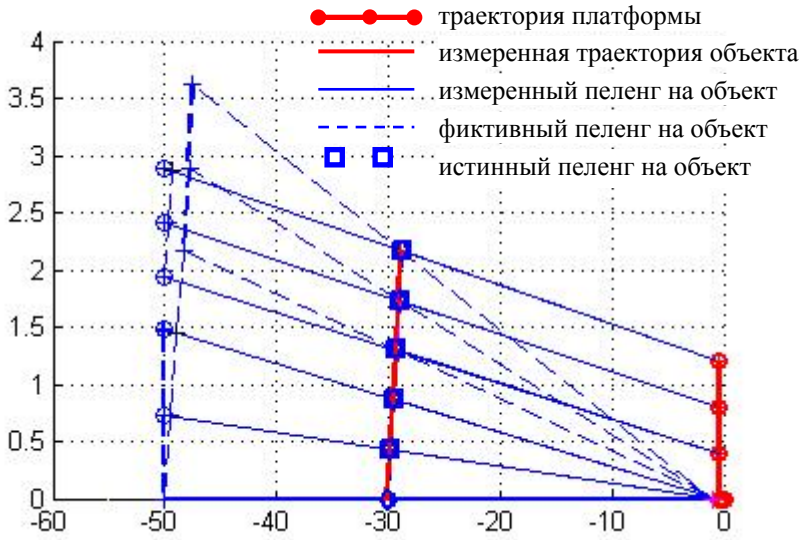



Рис. 2. Измерения положения объекта без учета шумов

**Алгоритм решения при наличии шумов**. Пеленги измеряют непрерывно через 2 сек. Поток измерений разделяется на блоки. Внутри каждого блока производится сглаживание пеленгов путем аппроксимации степенными полиномами. В конце блока пеленгов получаем один базовый пеленг, с которым производятся вычисления. Важно установить оптимальный размер блока для вычисления базового пеленга. С одной стороны, при большом интервале повышается точность вычислений, а, с другой стороны, увеличивается время вычислений. При анализе было принято время между базовыми пеленгами =1.5мин, (это 45 измерений пеленга каждые 2 сек). При этом первые предварительные результаты расчетов получаются после 4 пеленга, через 6 мин после начала измерений. Через 9 мин, после 6 пеленга получаем уточненные результаты расчетов. На рис. 3, 4 приведен результат вычисления параметров движения объекта, с учетом шумов при измерении пеленгов. Уточнение параметров движения объектов производятся следующим образом. Пеленги $M_4$, $M_5$ и $M_6$ проектируют на ось АЕ и заново вычисляем угол $\beta$ - угол между прямой $A_nE_n$ и траекторией объекта $A'_nE'_n$ по формулам (1, 2, 3), с учетом того, что $A_nB'_n = B'_nE'_n$. В формуле (1) заменяем курсовые углы на объект $\alpha_1$, $\alpha_2$ на углы $\alpha_4$ и $\alpha_5$.

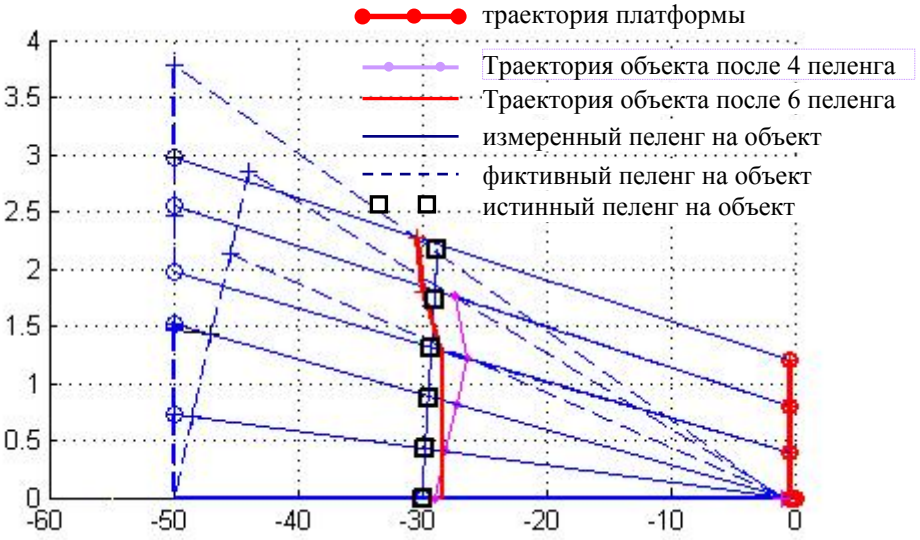



Рис. 3 Траектории движения объекта после 4 и после 6 пеленга, с учетом шумов

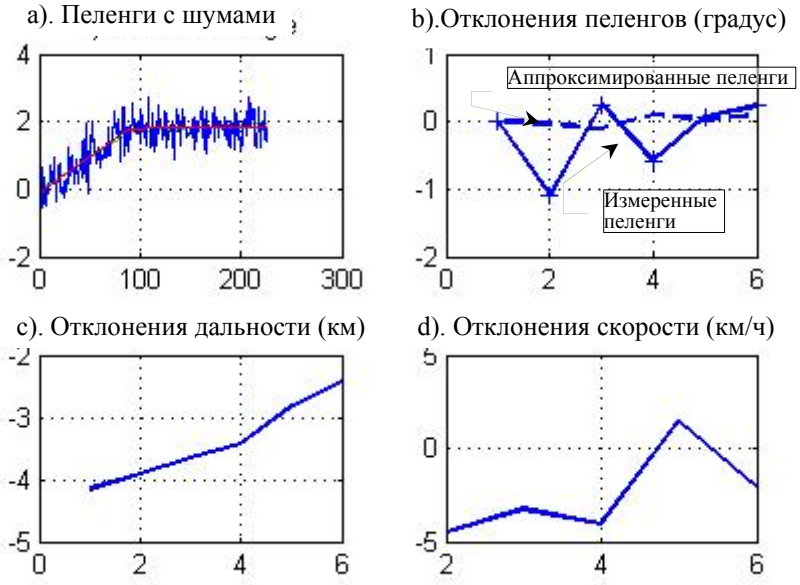



Рис. 4. Отклонения рассчитанных характеристик движения объекта от истинного значения при наличии шумов.

На рис. 4a по горизонтальной оси отложены номера пеленгов, измеряемых через 2 сек. На рис. 4b,c,d - по горизонтальной оси отложены номера базовых пеленгов, рассчитанных через 1.5 мин (45 измерений пеленгов через 2 сек.). Данные на рис. 3 и 4 приведены для одного набора случайных чисел. Шумы пеленгов вводят с помощью генератора случайных чисел, распределенных по нормальному закону со среднеквадратичным отклонением 0.4. Для анализа правильности работы алгоритма был произведен расчет 100 вариантов наборов случайных чисел. Финальные результаты изображены на рис. 5. Размер блока пеленгов, взятый для вычисления базового пеленга равен 45, что соответствует 1.5 мин. между базовыми пеленгами. Время между 1 и 4 базовыми пеленгами, необходимое для предварительного расчета параметров движения объекта равно 6 мин. Время между 1 и 6 базовыми пеленгами, необходимое для корректировки параметров движения объекта составляет 9 мин.

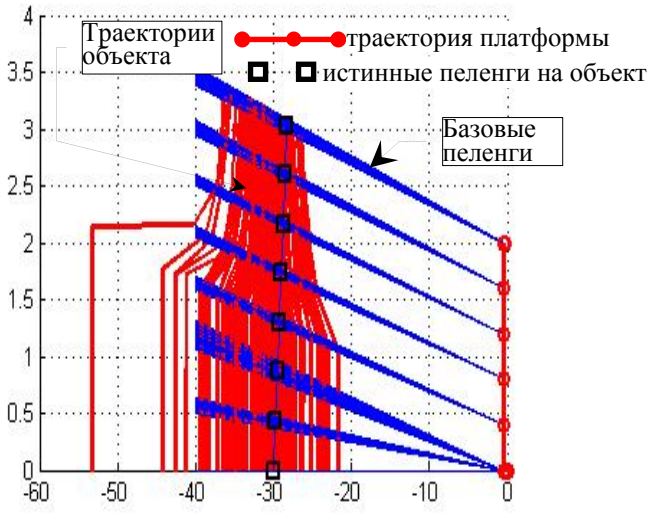



Рис. 5. Параметры движения объекта с учетом шумов

## Список литературы

1. Справочник штурмана/ Под общей редакцией контр адмирала В.Д.Шандабылова/М.: Ордена Трудового Красного Знамени Военное издательство министерства обороны СССР, 1968.- 542 с.

УДК 621.356; 621.372

*В.Г. Мелкумян, д.т.н., проф., І.А. Приходько, аспірант*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# МОНІТОРИНГ ХАРАКТЕРИСТИК ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ.

*Наведений аналіз основних параметрів диференціальних супутникових навігаційних систем таких як цілісність , точність, безперервність обслуговування, тощо.*

Навігаційний сервіс GNSS, який надається користувачам, полягає у розповсюдженні навігаційних сигналів супутників GPS і ГЛОНАСС (а у подальшому і Galileo) і диференціальної корегувальної інформації, яка формується функціональними доповненнями супутникових навігаційних систем, як широкозонними (WAAS, EGNOS, Skyfix тощо), так і регіональними (SAPOS, CORS, AGNES, СКНЗУ тощо).

Від виду послуг, які надаються користувачам, залежить склад контрольованих параметрів якості навігаційного забезпечення. Так, для послуг реального часу серед складових аналізу якості послуг першочерговою є SIS-верифікація (SIS – Signal in Space – сигнал у просторі). По суті SIS-верифікація забезпечує контроль сигналу, що поширюється і використовується з метою навігації, який є єдиним продуктом виробленим GNSS в комплексі з функціональними доповненнями.

Разом з SIS-верифікацією, яка забезпечує контроль принципового отримання сигналів необхідної якості, для реального часу важливими е й інші характеристики якості навігаційного забезпечення. До них відносяться, безперервність, цілісність і точність.

Точність визначення координат є одним з основних показників якості навігаційного забезпечення. Під точністю треба розуміти різницю між обчисленим і дійсним місцем розташування. Для будь-якого обчисленого місця розташування ймовірність, що помилка визначення координат перебуває в межах вимог до точності, повинна бути не менше заданого рівня (для більшості навігаційних користувачів ця ймовірність складає 95%). При цьому точність визначається як імовірність для кожного конкретного виміру, а не як відсоток вимірів на конкретному вимірювальному інтервалі.

З точністю напряму пов’язані поняття захисних рівнів: горизонтального та вертикального, які характеризують точність визначення координат, яка досягається з наперед заданою надійністю. Горизонтальний захисний рівень (Horizontal Protection Level, HPL) – це величина, яка з заданою ймовірністю перевищує горизонтальну складову різниці точних і обчислених координат (проекцію цієї різниці на горизонтальну площину). Вертикальний захисний рівень (Vertical Protection Level, VPL) – це величина, яка з заданою ймовірністю перевищує вертикальну складову різниці точних і обчислених координат.

Точність навігаційних визначень на практиці характеризують величинами захисних рівнів. Захисні рівні оцінюються на основі коваріаційної матриці рішення навігаційної задачі.

Добре відома лінеарізована форма навігаційної задачі має вигляд:

$$HX + \varepsilon = Y$$

де $X$ – чотиривимірний вектор оцінюваних параметрів (поправок до координат приймача в системі координат WGS84 і розбіжності шкал часу приймача і супутникової системи);

$Y$ – $N$-вимірний вектор, що формується на основі навігаційних вимірів, отриманих для $N$ супутників, які спостерігаються приймачем;

$H$ – матриця спостережень (матриця часткових похідних навігаційних вимірів по оцінюваних параметрах);

$\varepsilon$ – вектор погрішностей вимірів, який характеризується коваріаційною матрицею $W$.

Рішення цієї задачі і його коваріаційна матриця в системі координат WGS84, згідно з методом найменших квадратів, мають вигляд:

$$\hat{X} = \left(H^T W^{-1} H\right)^{-1} H^T W^{-1} Y,$$

$$Cov(\hat{X}) = \left(H^T W^{-1} H\right)^{-1}.$$

При цьому доцільно використовувати діагональну матрицю $W$, на діагоналі якої розташовані величини

$$\sigma_i^2 = \sigma_{нет.коорд.,i}^2 + \sigma_{троп,i}^2 + \sigma_{іон,i}^2 + \sigma_{мп,i}^2 + \sigma_{ш,i}^2$$

де $\sigma_{нет.коорд.,i}^2$ – дисперсія залишкової погрішності після компенсації складової погрішності вимірів, обумовленої неточністю координат і шкали часу $i$-го навігаційного супутника;

$\sigma_{троп,i}^2$ – дисперсія залишкової погрішності після компенсації складової погрішності вимірів, обумовленої проходженням навігаційного сигналу $i$-го супутника крізь тропосферу;

$\sigma_{іон,i}^2$ – дисперсія залишкової погрішності після компенсації складової погрішності вимірів, обумовленої проходженням навігаційного сигналу $i$-го супутника крізь іоносферу;

$\sigma_{мп,i}^2$ – дисперсія складової погрішності вимірів, обумовленої множинним поширенням сигналу;

$\sigma_{ш,i}^2$ – дисперсія складової погрішності вимірів, обумовленої шумами різного походження.

Величини доданків, які входять до складу останнього виразу, визначаються точністю корекцій, що були введені у виміри, і оцінюються відповідно до алгоритмів, за якими були сформовані ці корекції.

Значно зручніше працювати з координатами, представленими в місцевій геодезичній системі координ

ат ENH (East North Height), в якій перша координатна вісь спрямована на схід, друга – на північ, а третя – вертикально вгору для місця розташування приймача навігаційних сигналів. Рішення навігаційної задачі та його коваріаційна матриця у цій системі координат обчислюється наступним чином:

$$\hat{X}_{ENH} = T \cdot \hat{X},$$

$$Cov(\hat{X}_{ENH}) = T \cdot Cov(\hat{X}) \cdot T^T$$

де $T = \begin{pmatrix} -\sin\lambda & \cos\lambda & 0 & 0 \\ -\cos\lambda\sin\varphi & -\sin\lambda\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ \cos\lambda\cos\varphi & \sin\lambda\cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ – матриця переходу від системи координат WGS84 до системи координат ENH (матриця повороту),

$\lambda$, $\varphi$ – довгота і широта місця розташування приймача навігаційних сигналів.

Цілісність (Integrity) у супутниковій радіонавігаційній системі є одним з найбільш важливих параметрів. Це поняття визначається як міра довіри до інформації, що представляється споживачеві, як супутниковою системою, так і її функціональним доповненням. Цілісність містить у собі здатність системи забезпечити користувача своєчасним і обґрунтованим попередженням у тому випадку, якщо інформацією користуватися не можна при виконанні запланованої операції (наприклад, спрацьовування сигналізації).Характеристика цілісність має відношення, як для угрупування навігаційних супутників, так і для космічних (GBAS) чи наземних (GBAS, GRAS, LAAS) доповнень. Цілісність оцінюється для сукупності всіх сигналів і видів інформації, що отримуються користувачами.ілісність даних повинна підтримуватися протягом всієї процедури обробки

цих даних. Так, при виконанні операції точного заходу на посадку по 1 категорії метеоминимуму ризик втрати цілісності повинен бути 2·10-7 на один захід на посадку. Тобто, якщо станція GBAS передає на борт повітряного судна повідомлення типа 1 (кожну секунду 2 повідомлення), то із 10 мільйонів повідомлень тільки 2 можуть бути недостовірними в момент часу здійснення заходу на посадку. Відповідно до класифікації цілісності аеронавігаційної інформації дані ризику втрати цілісності GBAS при передачі повідомлення типу 1 під час заходу на посадку визначаються як критичні (2×10-7). Ризик втрати цілісності в супутниковій навігаційній системі GBAS, що її й відрізняє від традиційних, пов'язаний з багатьма характеристиками. У першу чергу станція GBAS бере на себе відповідальність за характеристики сигналів і інформацію, передану з навігаційних супутників. Зокрема виявляє й виключає з розрахунків «нездоровий» супутник не виявлений службою стандартного визначення місця розташування GPS (SPS) і службою каналу стандартної точності ГЛОНАСС (CSA) [1, 2].

Визначимо ризик втрати цілісності системи GBAS як імовірність втрати цілісності в конкретному місці в конкретний час і розглянемо основні складові ризику й виділимо напрямку побудови систем оцінки цих складових. Вихідним пунктом оцінки ризику втрати цілісності будемо вважати ймовірність втрати цілісності при заході на посадку аж до точного заходу на посадку по I категорії. Ця ймовірність для станції GBAS повинна бути менше 1,5 × 10-7. Зі значення 2 × 10-7 на бортове встаткування передбачається 0,5 × 10-7 .

Особливістю GBAS є те, що вона містить три апаратурні складові: наземний сегмент (властиво наземна станція GBAS), космічний сегмент (навігаційні супутники GPS, ГЛОНАСС, GEO) і бортову супутникову навігаційну підсистему. Між цими трьома складовими й розподіляється ризик втрати цілісності. У наземній станції GBAS повинна формуватися інформація про цілісність властиво станції GBAS, включаючи радіозасоби передачі коригувальної інформації, і сигналу в просторі навігаційних і геостаціонарних супутників.

Наукові дослідження, натурно-модельні експерименти, досвід створення й експлуатація системи LAAS (США) [3-4] дозволили сформувати розподіл ризиків втрати цілісності наземної апаратури типу GBAS і космічного сегмента. Дерево розподілу ризиків сформовано на підставі нормативних документів і стандартів США, міжнародних стандартів і рекомендованої практики ICAO, багаторічних спостережень за навігаційними супутниками GPS службою SPS [1] і великих наукових досліджень, проведених у США з 1975 року.

Відповідно розподілу ризик втрати цілісності за рахунок наземної апаратної частини (ліва галузь) у три рази менше ризику втрати цілісності через космічний сегмент. На частку останнього доводиться ймовірність, рівна 1.4×10-7 за захід. Особливо слід зазначити дуже малий ризик втрати цілісності для радіоканалу (≤ 5 × 10-11 за захід). Дерево розподілу ризиків втрати цілісності постійно вдосконалюється в частині моделей для обліку всіх складових апаратурою GBAS. Це накладає певні правила як на проектування станції, так і на застосування різних функціональних складових у ній. Практично по кожній складовій дерева розподілу ризиків в апаратурі повинен проводитися програмний або апаратний моніторинг, який підтверджує працездатність апаратури або неприступність навігаційних даних. Результати моніторингу у вигляді інтегрованого параметра передаються на борт повітряного судна у відповідному типі повідомлення.

Розглянемо деякі складового ризику втрати цілісності через відмови далекомірних джерел (навігаційних супутників). Незважаючи на те, що службою SPS виробляється контроль за станом навігаційних супутників GPS і інформація про «здоров'я» супутника передається в навігаційних даних, частина часу кожні із супутників GPS перебуває в зоні недоступної для служби SPS [1]. Природно при цьому допускається, що параметри сигналів, переданих із супутника, можуть по різних причинах не відповідати гарантованим технічним вимогам. Ці відхилення й повинна виявити наземна система, оцінити цілісність системи без обліку даних нездорового супутника, передати інформацію про «нездоров'я» навігаційного

супутника й підтвердити можливість застосування навігаційної системи при проведенні відповідної операції.

Складовою ризику втрати цілісності є перекручування сигналу переданого із супутника. Навігаційний супутник передає інформаційні сигнали, модульовані псевдовипадковою послідовністю імпульсів. Із супутника GPS за одну мілісекунду передається 1023 імпульсу, із супутника ГЛОНАСС – 511. В опорних приймачах наземної станції є точні копії цих сигналів. При збігу сигналу супутника й копії сигналу супутника в наземній станції виробляється інформація про псевдовідстані до даного супутника, що обчислюється з певною погрішністю. Якщо характеристики сигналу супутника перевищують припустимі відхилення, то погрішність визначення псевдовідстані стає неконтрольованою й даний супутник необхідно виключити при подальших розрахунках. Іншим істотним фактором, що впливає на цілісність, є природні або спеціально організовані перешкоди. Безпосередньо з цілісністю зв’язане поняття експлуатаційної готовності – частки часу, протягом якого система, яка використовується для навігації, забезпечує надійну навігаційну інформацію.

Безперервність обслуговування, показник, що зв'язаний безпосередньо з основними вихідними параметрами супутникової навігаційної системи – точністю й цілісністю й визначається, як здатність системи забезпечити вихідні навігаційні параметри із заданою точністю й цілісністю на інтервалі часу проведення відповідної операції. У випадку точного заходу на посадку безперервність є ймовірність забезпечення вихідних параметрів на короткому інтервалі часу (1- 8×10-6 у будь-які 15 секунд). Вихідними параметрами системи типу GBAS є дані, наведені у відповідних типах повідомлень, переданих по ОВЧ радіоканалу й параметри радіоканалу, передбачені вимогам до системи. Вимоги безперервності при заході на посадку розділяються на вимоги до наземного функціонального доповнення й вимоги до бортового встаткування. Безперервність супутникової навігаційної системи істотно залежить від доступності джерел далекомірних сигналів, які впливають на точність і цілісність.

## Висновки.

Контроль якості навігаційного забезпечення базується на визначеннях основних характеристик, та контролю принципового отримання сигналів необхідної якості, для реального часу. Від виду послуг, які надаються користувачам, залежить склад контрольованих параметрів якості навігаційного забезпечення.

## Список літератури

1. Global positioning system standard positioning service performance standard, Assistant secretary of defense for command, control, communications, and intelligence, Washington, DC, Oct. 2001, 66 p.

2. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС (Интерфейсный контрольный документ, пятая редакция). – М.: Координационный научно – информационный центр Российской федерации, 2002. – 57 с.

3. Minimum Aviation System Performance Standards for the Local Area Augmentation System. Washington, D.C.: RTCA SC-159, WG-4A, DO-245, Sept. 28, 1998

4. Minimum Operational Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment. Washington, D.C.: RTCA SC-159 WG-4A, DO-253, January 11, 2000.

УДК 621.356; 621.372

*В.В. Загоруйко, к.т.н, с.н.с. (ЦНДІ навігації та управління, Україна),*
*Т.Л. Малютенко (Національний авіаційний університет, Україна)*

# КРИТЕРІЇ ЯКОСТІ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНО-КОРЕГУВАЛЬНОЇ СТАНЦІЇ

*Проведено аналіз та класифікації моделей основних джерел похибок навігаційних визначень та диференційних методів їх корекції.*

Визначення координат об’єкту чи пункту земної поверхні або повітряного простору в реальному часі при використанні сигналів навігаційних супутників глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS) здійснюються шляхом розв'язку навігаційного рівняння, тобто системи рівнянь, коефіцієнтами яких є функції відстані між приймачем GNSS та спостережуваними навігаційними супутниками, які зазвичай називають псевдовідстанями. Точність визначень координат головним чином залежить від точності вимірювання псевдовідстаней приймачами GNSS користувачів [1]. Для реалізації високоточних визначень координат в реальному часі найбільш ефективним є шлях використання приймачами GNSS (додатково до інформації навігаційних супутників) диференційної коригуючої інформації [2]. При цьому як при вимірюванні приймачами GNSS користувачів кодових псевдовідстаней, так і при визначенні псевдовідстаней шляхом вимірювання фази несучої сигналів навігаційних

Похибки вимірювань псевдовідстаней залежить від цілого ряду факторів, які є різними для різних джерел диференціальної корегувальної інформації (ДКІ). В результаті глобальний критерій якості ДКІ реалізується шляхом реалізації часткових критеріїв для окремих факторів, властивих конкретним джерелам ДКІ. Отже, необхідним є визначення часткових критеріїв ДКІ для кожного джерела ДКІ для реалізації глобального критерію якості ДКІ.

Кодові псевдо відстані, вимірювані приймачами GNSS моделюються нижче приведеним рівнянням, яке найбільш повно враховує можливі джерела похибок вимірюваних псевдовідстаней [3-5]:

$$\rho^k = r + C\left(dt - dt^k\right) + d\rho^k + T^k + I^k + m^k + n^k, \qquad (1)$$

де $\rho^k$ - вимірювана кодова псевдо відстань до k-ого навігаційного супутника;

r – геометрична (істинна) відстань між приймачем GNSS (фазовим центром антени приймача GNSS) і k-м навігаційним супутником;

dt – похибка (відхилення від часу GNSS) годинника приймача GNSS4

dtk – похибка (відхилення від часу GNSS) годинника k-ого навігаційного супутника;

$d\rho^k$ - похибка координат k-ого навігаційного супутника;

Ik – похибка, зумовлена зменшенням швидкості сигналу k-ого навігаційного супутника при проходженні через іоносферу;

Tk – похибка, зумовлена рефлексією сигналу k-ого навігаційного супутника при проходженні через тропосферу;

mk – похибка, зумовлена багатопроменевим надходженням сигналу k-ого навігаційного супутника в приймач GNSS;

nk – похибка, зумовлена тепловим шумом в приймачі GNSS.

Із аналізу виразу (1), тобто моделі кодових псевдовідстаней, випливає, що глобальним критерієм оцінки якості ДКІ для приймачів з кодовим вимірюванням псевдовідстаней є мінімальна сумарна похибка $\Delta\rho^k = C\left(dt - dt^k\right) + d\rho^k + I^k + T^k + m^k + n^k$, так як при цьому значення вимірюваної псевдовідстані $\rho^k$ максимально наближається до значення геометричної і здійснюються високоточні визначення координат. Очевидно, що мінімальне значення $\Delta\rho^k$ реалізується при мінімізації шляхом застосування ДКІ всіх складових $\Delta\rho^k$,

тобто частковими критеріями якості ДКІ для кодових вимірювань псевдовідстаней є мінімальні значення складових сумарної похибки $\Delta\rho^k$.

Джерелами ДКІ для приймачів GNSS з кодовим вимірюванням псевдовідстаней є локальні контрольно-коригуючі станції (ККС), космічні функціональні доповнення GNSS (WAAS, EGNOS, CWAAS,…), а також приватні мережі ККС і мережі постійно діючих станцій моніторингу GPS (CORS), наприклад CORS Міжнародної служби GPS (IGS) [2].

У випадку мережі CORS IGS [5-6] в якості ДКІ виступають корекції ефемерид навігаційних супутників, які зменшують похибку координат навігаційних супутників до 5 см, а також корекції для годинників навігаційних супутників, які зменшують похибку годинників навігаційних супутників до 0,2-5 нсек, тобто практично ліквідують похибку dtk. Але не коригуються значення решти похибок. Зазвичай ДКІ, продукована мережами CORS, використовується локальними ККС та приймачами GNSS користувачів при відсутності інших джерел ДКІ і доступності ДКІ, продукованої мережами CORS.

Локальні контрольно-коригуючі станції (ККС), які в англомовній літературі іменують reference або base stations, продукують ДКІ в вигляді корекцій псевдовідстаней, які визначаються як різниця між обчисленою з врахуванням даних альманаху і відомих координат ККС псевдовідстанню та виміряною псевдовідстанню. Тобто диференційна корекція $\Delta R^k$ для k-ого навігаційного супутника моделюється наступним виразом:

$$\Delta R^k = r^k + d\rho^k + C\left(dt - dt^k\right) + I^k + T^k + m^k + n^k - \tilde{r}^k, \quad (2)$$

де $\tilde{r}^k = r + d\rho^k + \Delta r$, (3)

$\Delta r$ - похибка координат контрольно-коригуючої станції.

З врахуванням виразу (3) вираз (2) для диференційної корекції набуває наступного вигляду:

$$\Delta R^k = C\left(dt - dt^k\right) + I^k + T^k + m^k - \Delta r. \quad (4)$$

Вимірювана приймачем GNSS псевдовідстань $\rho_r^k$ до k-ого супутника моделюється згідно (1) як

$$\rho_r^k = r_r^k + d\rho_r^k + C\left(dt_r - dt^k\right) + I_r^k + T_r^k + m_r^k + n_r^k, \quad (5)$$

де нижній індекс r вказує на приймач GNSS;

а у випадку використання диференційної корекції

$$\tilde{\rho}_r^k = \rho_r^k - \Delta R^k = r_r^k + d\rho_r^k + C\left(dt_r - dt\right) + I_r^k - I^k + T_r^k - T^k + m_r^k - m^k + n_r^k - n^k - \Delta r. \quad (6)$$

Із аналізу (6) випливає, що мінімізація сумарної похибки коригованої псевдовідстані $\tilde{\rho}_r^k$ має місце при мінімізації похибки $\rho\Delta\rho_r^k$, наявності просторово-часової кореляції похибок, зумовлених затримкою сигналів в іоносфері, рефракцією сигналів тропосферою, а також мінімізації похибок внаслідок багатопроменевого надходження сигналів навігаційних супутників в приймачі GNSS користувачів і ККС, тепловим шумом приймачів GNSS користувачів і ККС, а також при мінімальній похибці координат ККС. При відсутності просторово-часової кореляції складових сумарної похибки псевдовідстані $\rho_r^k$ і диференційної корекції точність визначення координат приймачем GNSS користувача при застосуванні ДКІ локальних ККС лише погіршиться.

Похибки годинників dtr і dt приймачів GNSS користувачів і ККС відповідно в (6) не є корельовані, але можуть бути оцінені при обсерваці не менше 4-ох супутників GNSS шляхом розв'язування навігаційного рівняння. Хоча ефемериди навігаційних супутників регулярно коригуються, але в загальному випадку рівень орбітальної похибки може досягати 2 м [8]. Отже є доцільним наявність в складі ДКІ локальних ККС крім диференційних корекцій псевдовідстаней і корекцій ефемерид навігаційних супутників. Наприклад, використання інформації CORS IGS. Отже, одним із критеріїв якості ДКІ для приймачів

GNSS із кодовим вимірюванням псевдовідстаней є наявність корекцій ефемерид навігаційних супутників.

Іоносферні похибки, тобто похибки, зумовлені затримкою сигналів навігаційних супутників іоносферою, є одним із основних факторів, які погіршують точність визначення координат з допомогою приймачів GNSS. Значення іоносферних похибок визначаються станом іоносфери та активності Сонця. В період невисокої сонячної активності значення іоносферної похибки коливаються від 3-6 метрів вночі до 20-30 метрів вдень [6]. Тобто на порядок і більше перевищують орбітальні похибки. Шляхом моделювання з використанням інформації про стан іоносфери, яка передається в повідомленнях навігаційних супутників, рівень іоносферної похибки може бути зменшений на 50 %, але залишається неприйнятним для високоточних визначень координат. Як випливає із виразу (6) для корегованої шляхом застосування ДКІ локальної ККС вимірюваної приймачем GNSS користувача псевдовідстані, іоносферна похибка практично усувається при наявності просторово-часової кореляції. Оскільки кореляція іоносферних похибок деградує при збільшенні відстані між ККС і приймачем користувача, то одним із часткових критеріїв якості ДКІ, продукованої локальними ККС, є радіус зони дії локальної ККС, тобто зони, в якій деградація кореляції іоносферних похибок не приводить до неприйнятного значення погіршення точності визначення координат.

Тропосферні похибки зумовлені явищем рефракції (заломлення) сигналів навігаційних супутників при проходженні через тропосферу, яка простирається до висоти 15 км, що зумовлює суттєві збільшення іоносферної похибки у випадку невисоких значень кута маски спостережуваних приймачем GNSS навігаційних супутників. Якщо при значенні кута маски близькому 90º (тобто при розташуванні навігаційних супутників поблизу зеніту) значення тропосферної похибки наближається до 3 м, то при зменшенні кута маски до 30º тропосферна похибка зростає до 50 м.Зазвичай тропосферні похибки в приймачах GNSS і користувачів, і ККС зменшують шляхом моделювання з використанням моделей тропосфери Хопвілда (Hopfield) або Саасфаймоньяна (Saasfamoinen).Коригована шляхом моделювання тропосферна похибка зменшується до 90 % але залишається неприйнятно великою, особливо для значень кута маски, порядку одиниць градусів. Застосування ДКІ, продукованої локальними ККС, практично усуває тропосферну похибку при наявності просторово-часової кореляції. Оскільки тропосферна похибка зумовлюється атмосферними умовами, які відносно повільно змінюються протягом кілометрів, то має стан просторово-часова кореляція тропосферної похибки в радіусі десятків кілометрів від ККС. Отже, як і у випадку іоносферної похибки, частковим критерієм ДКІ, продукованої локальними ККС є радіус зони дії, в якій деградація просторово-часової кореляції не зумовлює неприйнятний рівень тропосферної похибки при визначенні координат приймачем GNSS користувача.

На відміну від іоносферних та тропосферних незалежно від відстані між ККС і приймачем GNSS користувача похибки, зумовлені багатопроменевим надходженням сигналів навігаційних супутників в приймачі GNSS користувачів і ККС, є по своїй суті некорельованими і застосування ДКІ лише збільшує їх вклад в похибку визначення псевдовідстаней приймачем GNSS користувача. Некорельованими є похибки, зумовлені тепловим шумом приймача GNSS користувача і ККС. Власне, похибки, зумовлені тепловим шумом, визначають значення максимальної точності визначення координат при застосуванні ДКІ локальних ККС, так як визначають точність вимірювання моменту часу максимальної кореляції кодів сигналів навігаційних супутників і ешелонного сигналу приймача GNSS. Без застосування спеціальних технологій похибки, зумовлені тепловим шумом, знаходяться в межах 3-300 м [5]. Використання спеціальних схемних рішень кореляторів забезпечило зменшення цього типу похибок до 20-30 см. Як випливає із (6) при суміщенні або зменшенні до сантиметрового рівня всіх інших похибок саме похибки, зумовлені тепловим шумом приймачів GNSS користувачів і ККС, визначатимуть максимально можливу точність визначення координат при використанні ДКІ, продукованої локальними ККС. Необхідно зазначити, що вище приведений висновок стосується не лише ДКІ локальних ККС, а ДКІ

будь-яких джерел, призначеної для кореляції кодових псевдовідстаней. Отже, важливими критеріями якості ДКІ локальних ККС є рівень похибок, зумовлених тепловим шумом приймачів GNSS користувачів і ККС, а також рівень похибок, зумовлених багатопроменевим надходженням сигналів навігаційних супутників в приймачі GNSS користувачів і ККС. Що стосується останнього критерію, то необхідно зазначити, без використання спеціальних засобів і заходів рівень похибки, зумовленої багатопроменевим надходженням сигналів навігаційних супутників GNSS є порядку метрів і може досягати сотень метрів. Тобто при використанні ДКІ локальних ККС з високим рівнем даної похибки лише погіршить точність визначення координат приймачем GNSS користувача.

Оскільки ДКІ локальних ККС надходить в приймачі GNSS з допомогою лінії передавання інформації, то частковими критеріями якості ДКІ локальних ККС є також затримка ДКІ, яка приводить до порушення часової кореляції, а також ймовірність спотворення передавальної ДКІ, яка порушує неперервність надходження ДКІ в приймачі GNSS користувачів.

В цьому випадку зникає залежність якості ДКІ від наявності просторової кореляції і продукована космічними функціональними доповненнями GNSS диференційна коригуючи інформація в ідеалі забезпечує можливість високоточних визначень координат в регіонах великих розмірів. Так зоною відповідальності EGNOS є територія і повітряний простір країн Євросоюзу, а також прибережні акваторії країн Євросоюзу.

Швидкі корекції необхідні для виправлення швидкозмінних похибок (зазвичай годинників супутників), зумовлених режимом обмеженого доступу (S/A). Повідомлення, в яких розміщуються швидкі корекції, включають в себе також оцінки UDRE (User Differential Range Error), тобто верхню межу залишкової похибки оцінки псевдовідстаней після застосування швидких корекцій. Швидкі корекції використовуються на всіх етапах польоту.

Призначення повільних корекцій полягає в усуненні орбітальної похибки (тобто координат навігаційних супутників) та повільних змін (дрейфу) точності годинників навігаційних супутників.

## Висновки

Підсумовуючи аналіз зменшення похибок вимірюваних значень кодових псевдовідстаней шляхом використання ДКІ локальних ККС можна зробити висновок, що основними частковими критеріями оцінки якості ДКІ є точність визначення координат ККС, точність обчислення координат навігаційних супутників, відстані між ККС і приймачем GNSS користувача не лише має місце просторова кореляція іоносферних і тропосферних похибок, а також рівень похибок, зумовлених тепловим шумом приймача GNSS в складі ККС та рівень похибок, зумовлених багатопроменевим надходженням сигналів навігаційних супутників в приймач GNSS в складі ККС.

## Список літератури


1. *Kaplan E.D.* (ed). Understanding GNSS: Principles and applications. - Boston. Artech House Inc., 1996.

2. Розроблення загальнотеоретичних засад диференційних методів, пов’язаних з просторово часовою кореляцією основних джерел похибок навігаційних визначень // Проміжний звіт по HDP, № державної реєстрації 01080004005, Київ, Національний авіаційний університет, 2008.

3. *Angus J.* Statistics in satellite Navigation // Internet: www.cgu.edu.

4. *Misra P., Enge R.* Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance. + Second edition.. – Lincoln, MA(USA), 2006.

5. *Lochepelle G.* Carrier Phase Measurements Characteristics and Utilization Overview // Internet: www.ensu.ucolgary.ca

6. *Gao Y., Shen M., M. Abdel-Salam.* Global Differential Positioning without base station // Geographic Information Sciences, vol 8,no.1, June 2002 .

УДК 621. 396: 621.372

*В.Г. Мелкумян, д.т.н., професор, В.М. Кондратюк*
*(Національний авіаційний університет, Україна)*

# ОЦІНКА ЯКОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОЇ КОРИГУВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

*В статті розглянуто два важливих статистичних тести, один з них призначений для перевірки правильності супутникових корекцій (UDRE перевірка), а другий призначений для перевірки іоносферних корекцій (GIVE перевірка).*

Диференціальна підсистема через обмеження часу на формування корегувальної інформації здійснює тільки експрес-аналіз корегувальної інформації і інформації про цілісність, що може привести до виникнення похибок.

Розширений аналіз виконує статистичні тести для перевірки правильності переданих граничних рівнів для супутникових корекцій (UDRE) і для іоносферних корекцій (GIVE). Для нього можливо не тільки виявлення факту наявності помилок, але і їхня ідентифікація.

Для тесту UDRE всі виміри для одного супутника комбінуються для того, щоб обчислити максимальну статистичну інформацію цього супутника і якість корекцій псевдовідстані.

Тест GIVE комбінує всю іоносферну інформацію (із двочастотних вимірів) у єдину оцінку іоносферної затримки в іоносферних вузлових точках (IGP). Ці оцінки потім порівнюються зі значеннями з алгоритму обробки інформації і її границями похибки.

Інтегральний моніторинг якості навігаційних визначень призначений для рішення наступних завдань:

- перевірки якості навігаційних сигналів і цифрової інформації, переданих споживачеві;
- перевірки якості підготовленої корегувальної інформації;
- оцінки очікуваної точності координатних визначень споживачів у межах території, що обслуговується.

Вхідними параметрами для моніторингу є повний обсяг вимірювальної й цифрової інформації, зареєстрованої всіма контрольними станціями (КС) – станціями моніторингу – системи моніторингу з тактом одна секунда, координати КС у системі координат WGS-84 тощо. Вихідними параметрами є признаки стану, що характеризують якість функціонування навігаційних супутників, контрольних станцій мережі і вірогідність диференціальної коригувальної інформації (ДКІ).

У цілому алгоритм контролю (моніторингу цілісності) містить у собі наступні алгоритми:

- алгоритм попередньої обробки й атестації;
- експрес-аналіз вхідної інформації;
- детальний аналіз інформації й отриманої ДКІ;
- алгоритм контролю якості обслуговування.

Головне завдання попередньої обробки й атестації – проведення попередньої обробки вимірювальної інформації (ВІ) з метою максимальної «очищення» даних для полегшення контролю. Тому «сирі» виміри піддаються тестуванню для підтвердження їхньої вірогідності. Використані тести включають перевірку псевдовідстаней й фазових вимірів, виключення багатопроменевість, визначення фазових сліпів і їхнє усунення.

Всі дані, що надходять від КС, перевіряються на вірогідність навігаційних даних (ефемеридних даних і даних альманаху), часу, іоносферних параметрів, зсуву шкал часу щодо шкал часу GPS і GLONASS і т.д.

Вимірювальна інформація попередньо обробляється й підготовляється для тестування. Це припускає корекцію тропосферних затримок, а також облік інших факторів.

Для зменшення шуму приймача обчислюється псевдовідстань, згладжена з використанням фази. Далі здійснюється обчислення іоносферної затримки й формується «безіоносферна» комбінація фазових вимірів («безіоносферна» псевдовідстань). Обчислена іоносферна затримка використовується в рамках алгоритму контролю ДКІ.

В експрес-аналізі вхідної інформації проводяться тільки грубі перевірки цілісності робочого сузір'я супутників і диференціального доповнення як єдиного цілого без поділу на компоненти. При цьому проводяться два головних тести: контроль точності визначення місця розташування й грубий комбінований тест залишкових погрішностей псевдовідстаней. Через обмеженість часу встановлюється тільки факт наявності підвищених погрішностей, а їхня ідентифікація не проводиться.

Детальний аналіз інформації й разом із ДКІ це основа моніторингу цілісності. Його завдання полягає в перевірці цілісності прийнятих корекцій. Тому в його рамках реалізовані два важливих статистичних тести. Один тест призначений для перевірки правильності супутникових корекцій (UDRE перевірка), другий призначений для перевірки іоносферних корекцій (GIVE перевірка).

Алгоритм контролю якості обслуговування забезпечує аналітичне вираження якості функціонування диференціального доповнення і являє собою зважене середнє погрішностей координатних визначень у деяких точках з відомими координатами в межах території, що обслуговується. При цьому, природно, покладається, що координатні визначення здійснюються з використанням ДКІ.

Блок-схема алгоритму аналізу признак і оголошення «тривоги» наведена на рис. 1.

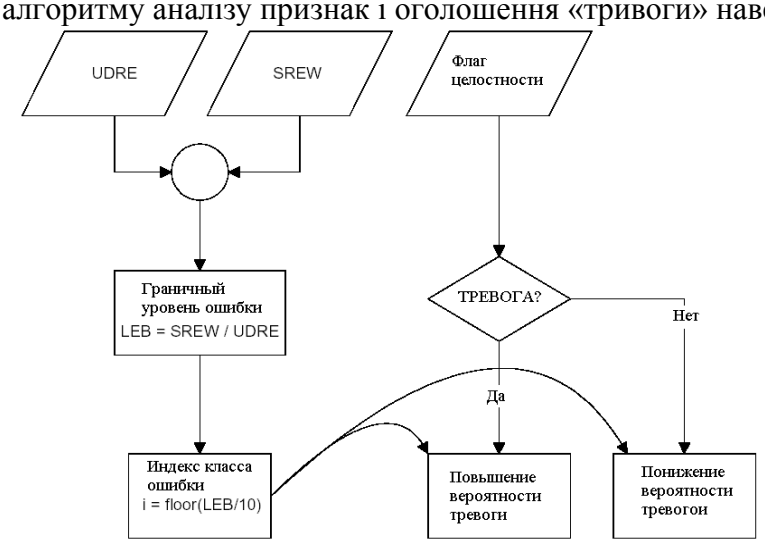



Рис. 1. Блок-схема алгоритму аналізу признак і оголошення «тривоги»

Задача алгоритму перевірки UDRE – перевіряти чи адекватно обмежує передана UDRE залишкові погрішності корекції помилок параметрів орбіти й відходу шкал часу супутників.

Після того, як коригувальні виправлення враховані в «безіоносферній» псевдовідстані, сформованій алгоритмом попередньої обробки й атестації, рівняння псевдовідстані можна записати в наступному вигляді:

$$R^i_{sm,r} = \rho^i_r + \delta_r - \delta^i_{res} + \delta^i_{Orb,r,res} + v^i_{r,R_{sm}} \qquad (1)$$

де $R^i_{sm,r}$ – згладжена псевдовідстань із r-ої КС до і-го супутника;

$\rho^i_r$ – геометрична відстань між r-ої КС і і-м супутником;

$\delta_r$ – похибка годин r-ої КС;

$\delta^i_{res}$ – залишкова похибка годин і-го супутника;

$\delta^i_{Orb,r,res}$ – залишкова похибка через похибку координат і-го супутника;

$v^i_{r,R_{sm}}$ – шум і інші ефекти, що не моделюються.

Для обчислення дійсних залишкових погрішностей після корекції проводиться виключення з вимірів розбіжностей годин КС зі шкалою часу GPS. Ця розбіжність обчислюється як середнє значення всіх відхилень псевдовідстаней від відповідних геометричних відстаней «КС - спостережуваний супутник». Це припускає що всі (або більшість) уведених коригувальних виправлень правильні.

У цьому випадку похибка оцінювання відхилення годин КС буде:

$$\varepsilon^i_r = \varepsilon^i_{r,clk} - \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\varepsilon^k_{r,clk} = -\varepsilon^i_{res} + \varepsilon^i_{Orb,r,res} + \varepsilon^i_{r,v} \quad (2)$$

де $\varepsilon^i_{res} = \left(\delta^i_{res} - \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\delta^k_{res}\right)$;

$$\varepsilon^i_{Orb,r,res} = \left(\delta^i_{Orb,r,res} - \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\delta^k_{Orb,r,res}\right);$$

$$\varepsilon^i_{r,v} = \left(v^i_{r,R_{sm}} - \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}v^k_{r,R_{sm}}\right);$$

n - кількість супутників, спостережуваних на даної розглянутої КС.

Функція впливу деякої довільної погрішності знання координат супутника на виміри користувача дозволяє припустити, що усередині території, що обслуговується, залишкові погрішності знання координат супутника можна представити у вигляді площини.

Параметри даної площини оцінюються й екстраполюються для найгіршого розташування користувача в межах території, що обслуговується. При виборі точки з найгіршим розташуванням користувача враховується умова радіовидимості навігаційного супутника. Значення функції (площини) у найгіршій позиції користувача являє собою залишкову похибка у точці з найгіршим розташуванням користувача.

По всіх вимірах псевдовідстаней (на різних КС) для одного супутника оцінюються параметри відповідної площини. Площина визначається наступними трьома параметрами:

- значенням функції в довільній точці ( $f_{Bias}(\lambda_0, \phi_0)$ );
- двома градієнтами в напрямку широти й довготи ($\alpha$ і $\beta$).

Тому зазначена функція (площина) представляється наступною формулою:

$$f_{Bias}(\lambda,\phi) = f_{Bias}(\lambda_0,\phi_0) + \alpha\cdot(\lambda-\lambda_0) + \beta\cdot(\phi-\phi_0) \quad (3)$$

Після рішення відповідної системи лінійних рівнянь, оцінка значення SREW (залишкова похибка у точці з найгіршим розташуванням користувача) для даного конкретного супутника представляється в наступній формі:

$$SREW_{CS,estimated} = \max_{\lambda,\phi}\left(\left|f_{Bias}(\lambda,\phi)\right| + k\cdot\sqrt{Var\left(f_{Bias}(\lambda,\phi)\right)}\right) \quad (4)$$

Оцінка даного параметра, залежно від вимірювального шуму, неоднозначна. Параметр $Var\left(f_{Bias}(\lambda,\phi)\right)$ залежить від розташування споживача й апріорної інформації про шум вимірів. Оцінені шумові погрішності вимірів не використаються як апріорний шум, інакше будуть отримані занадто оптимістичні значення точності координатних визначень

споживачів. Параметр $Var(f_{Bias}(\lambda,\phi))$ повинен гарантувати, що даний апріорний шум характеризує тропосферні й ефекти, що не моделюються.

Вплив параметра $Var(f_{Bias}(\lambda,\phi))$ варіюється шляхом його множення на деякий коефіцієнт k, що визначається ймовірністю фіктивної тривоги й імовірністю пропущеної помилки, тобто ризик розподіляється пропорційно між цілісністю й безперервністю.

Тривога (признака "не використовувати") для супутника включається, якщо оцінене значення SREW досягає переданого значення UDRE.

Особлива увага приділяється випадку, коли перевірка UDRE виявляє помилку в корекціях. У цьому випадку здійснюється пошук джерела виявлених відхилень. Помилки корекції для конкретного супутника впливають на перевірки інших корекцій, а не тільки на перевірки для даного супутника. Це визначається тим, що відхід годин КС обчислюється з використанням вимірів більш ніж одного окремо взятого супутника, тобто трохи скоректованих псевдовідстаней використовуються в обчисленні величини розбіжності шкали часу GPS і годин КС. Таким чином, наявні помилки вплинуть на всі виконувані перевірки, які взаємозалежні через помилку годин КС.

Ідентифікація похибки, використовувана в перевірці UDRE, ґрунтується на тому факті, що статистичні характеристики для дійсних помилок будуть набагато гірше, ніж для будь-яких інших.

UDRE і GIVE-перевірки розглядаються як незалежні, у змісті визначення помилки, тому що вхідні дані для UDRE-перевірки – це безіоносферні псевдовідстані, у той час як GIVE-перевірка ґрунтується на двочастотних вимірах, що містять іоносферні затримки. Потенційні помилки годин у даному тесті скорочуються й у такий спосіб GIVE-перевірки незалежні від результатів UDRE-перевірок.

Алгоритм GIVE-перевірки заснований на тім, що оцінка вертикальної затримки у вузловій точці отримана з одного єдиного виміру в підіоносферній точці, а дана стаття не дає можливості розглянути цей алгоритм.

## Висновки

Розширений аналіз, який забезпечується системами моніторингу якості навігаційних послуг, забезпечує контроль наданої корегувальної інформації й ідентифікацію джерел похибок, що впливають на зниження якості, що дає змогу впливати на якість функціонування диференціальної підсистеми.

## Список літератури


1. Науково-технічний звіт з НДР „Створення та експлуатація системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем. Сертифікація системи ”, шифр «Безпека», НАУ, 2008 р., 217 стор.

2. USER’S MANUAL FOR THE APPLICATION OF THE MUSSST METHODOLOGY TO CIVIL AVIATION. [MUSSST (Multimodal Safety Satellite System for Transport) is a study funded by European Commission under the transport RTD programme of the 4th framework programme], September 2000, 123 p.p.

3. Global positioning system standard positioning service performance standard, Assistant secretary of defense for command, control, communications, and intelligence, Washington, DC, Oct. 2001, 66 p.

4. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС (Интерфейсный контрольный документ, пятая редакция). – М.: Координационный научно – информационный центр Российской федерации, 2002. – 57 с.

5. *S. Oszczak, A. Ciecko, M. Bakula, D. Popielarczyk, J. Balint, G. Manzoni, R. Cefalo*, “Estimation of Accuracy of EGNOS System Test Bed (ESTB) Car Navigation in Central European Countries in 2002”, ГНСС 2003 – The European Navigation Conference 22-25 April 2003/Austria

УДК: 656.7.022

*О.В. Ізвалов, О.І. Москаленко, В.М. Неділько, к.т.н.*
*(Державна льотна академія України (ДЛАУ), Україна)*

# АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ СКЛАДНОСТІ УПРАВЛІННЯ ПОВІТРЯНИМ РУХОМ

*Розглядаються підходи до оцінки складності управління повітряним рухом у контексті можливості їх застосування до оцінювання складності вправи на диспетчерському тренажері.*

Підвищення ефективності системи професійної підготовки спеціалістів з управління повітряним рухом (УПР) зараз є однією з важливих задач, розв'язання якої підвищить рівень безпеки польотів. У ДЛАУ ведуться дослідження, спрямовані на створення автоматизованої системи управління якістю професійною підготовки авіадиспетчерів (АСУ ЯППА) [1]. Важлива роль в ній відводиться впровадженню індивідуального підходу до навчання з активним використанням процедурних тренажерів в навчальному процесі. Для успішного впровадження індивідуального підходу важливо мати методику визначення складності вправи, що дозволить створювати вправи наперед заданого рівня складності, який визначається, виходячи з індивідуальної стратегії навчання.

В літературі з УПР формальне визначення складності зустрічається достатньо рідко. Загальні ознаки складних систем, яким у повній мірі відповідає поліергатична система повітряне судно (ПС) – екіпаж – диспетчер – автоматизована система УПР, наведені в [2,3]:

- велика кількість елементів, взаємодія яких не піддається аналізу традиційними математичними засобами;
- динамічний характер взаємодії між елементами, яка пов'язана з передачею енергії та/або інформації;
- надмірність, що дозволяє деякій підмножині системи виконувати функції системи в цілому;
- локалізована автономія та відсутність обміну інформацією між усіма елементами системи;
- нелінійний характер взаємодії між елементами, внаслідок чого малі збурення можуть мати великі наслідки;
- не всі змінні системи можна спостерігати безпосередньо.

Визначення складності УПР, що можуть бути корисними для цілей нашого дослідження мають вигляд: «міра важкості розуміння конкретної динамічної повітряної обстановки (ДПО) диспетчером» [4] та «багатовимірний концепт, що включає в себе статичні характеристики повітряного руху та динамічну структуру повітряного руху» [5]. У [6] вказується на необхідність розрізняти складність УПР як:

- внутрішню властивість ДПО (situation complexity);
- суб'єктивне відчуття диспетчера (perceived complexity);
- властивість процесів, що відбуваються при виконанні задач УПР (cognitive complexity).

Для задач розвитку та підтримки на регламентованому рівні умінь та навичок авіадиспетчера первинним має бути така багатовимірна характеристика вправи, що описує міру застосування в ній компонентів моделі суб'єкта навчання. В той же час необхідність при генерації вправи визначення загального рівня навантаження, який та має викликати в диспетчера, обумовлює пошук скалярної величини, що має функціональну залежність від параметрів ДПО.

Визначення складності у багатьох сферах має три спільні компоненти. Це кількість елементів, їх різноманітність та взаємовідносини між ними. Для УПР у якості них виступають:

- загальна кількість ПС у секторі,
- різноманітність ПС за льотно-технічними характеристиками,
- доля ПС, що рухаються зі змінним профілем польоту,
- наявність/відсутність упорядкованості повітряного руху у вигляді переважних потоків,
- кластеризація ПС у відносно невеликій області повітряної зони (ПЗ),
- кількість та тип потенційно-конфліктних ситуацій і т.і.

Значна частина факторів складності, що створюють навантаження на диспетчера при УПР було виділено у одній з перших робіт у цьому напрямку [7]. Пропонувалося розділяти три типи завантаженості:

- така, що виникає внаслідок спостерігання індикатору кругового обзору без ПС на ньому (background load);
- що виникає внаслідок виконання процедур безконфліктного УПР (routine load);
- та, що виникає через необхідність підтримання безпечних інтервалів між ПС (airspace load).

Вперше введено одиницю завантаження: Dynamic Elements of Load (DEL), що визначається як завантаження, пов'язане з УПР одного ПС, що рухається через ПЗ прямолінійно, не змінюючи висоти протягом години. Після аналізу даних по 13 районних центрах УПР встановлено, що на завантаженність стандартними операціями значною мірою впливає положення границь сектора відносно превалюючих потоків повітряного руху.

У [8] розроблено модель завантаженості, що базується на кількості та тривалості дій, що пов'язані з прийняттям рішення диспетчером. На основі цих даний обчислюється Control Difficulty Index (CDI):

$$CDI = \sum_i W_i E_i ,$$

де $W_i$ – ваговий коефіцієнт дії, що залежить від тривалості її виконання;

$E_i$ – очікувана кількість дій на годину.

Цьому методу притаманна простота та зручність, внаслідок чого аналогічний метод досі використовується при обчисленні коефіцієнта завантаженості авіадиспетчера. Критика методу полягає в тому, що з його допомогою неможливо отримати інформацію про прийняття рішення диспетчером не виконувати жодних дій. Крім того, іноді не існує прямої залежності між часом на виконання процедури та її складністю. Значний внесок даного дослідження полягає в отриманні списку найбільш ресурсовимогливих процедур УПР.

Протягом останніх 20 років складність УПР вивчається у рамках концепції Вільного польоту (FreeFligh). Введено поняття Динамічної густини (Dynamic density, DD), що визначається як: "міра завантаженості диспетчера, що є функцією від кількості ПС та складності структури повітряного руху у підконтрольному об'ємі ПЗ."

DD визначається як функція від часу DD(t), обчислюється з двохвилинним інтервалом і залежить від таких параметрів, як [9]:

- кількість ПС, що змінили курс більше ніж на 15 градусів протягом 2 хвилин;
- кількість ПС, що змінили швидкість більше ніж на 10 вузлів (чи на 0,2 Маха) протягом 2 хвилин;
- кількість ПС, що змінили висоту більше ніж на 750 футів протягом 2 хвилин;
- кількість пар ПС, відстань між якими була менша 5 морських миль протягом 2-хвилинного інтервалу, і т.д.

Експерименти, що проводились для визначення вагових коефіцієнтів факторів у формулі DD показали сильну залежність даних коефіцієнтів від сектора, в якому велося дослідження. Але в межах одного сектору було досягнуто високий ($K_{кор}$=0,74) коефіцієнт кореляції між значеннями формули та поведінкою авіадиспетчера.

Спроба відобразити нелінійність характеру впливу факторів складності УПР на авіадиспетчера описана в [10]. Було побудовано нейронну мережа, яку навчали за величинами 16 факторів ставити 3-бальну оцінку складності повітряної ситуації. У якості

навчальної вибірки було використано дані за 12 годин на реальному районному центрі УПР та складність ситуацій, як їх оцінювали авіадиспетчери. За результатами навчання, у контрольній вибірці мережа успішно оцінили 99% ситуацій, що були оцінені диспетчерами як прості, 54% середньої складності та 11% складних. Роботи у цій сфері продовжуються. Але незважаючи на перспективний підхід, який вперше може дозволити урахувати взаємний вплив факторів ДПО, для цілей генерації вправ даний метод малопридатний. Завадою стає механізму переходу від цільової складності вправи до її компонентів.

Найбільш перспективним для використання при генерації індивідуально-орієнтованих вправ методом оцінювання складності УПР, на наш погляд, є описаний в [11] Traffic Load Index (TLI). Він обчислюється через дискретні проміжки часу за формулою:

$$TLI(t) = \sum_{i=1}^{N_{ПС}} tli_i(t),$$

де $tli_i$ – ваговий коефіцієнт і-го ПС, він варіюється в залежності від його положенні відносно інших ПС в межах від 1 (при безконфліктному русі) до 3,5 (при виникненні ситуації, яка потребує термінових дій для попередження небезпечного зближення);

$N_{ПС}$ – загальна кількість ПС, що знаходяться в повітрі.

Проведений дослідниками експеримент показав високу ($K_{кор}$=0,76) кореляцію TLI з рівнем складності УПР, як його відчуває авіадиспетчер. Ідеологія обчислення TLI дозволяє використовувати метод, розроблений нами для генерації вправ з заданою кількістю технологічних елементів [12] для отримання в них заданого TLI.

Для більш точного налаштування виконання вправи її вхідними даними також можуть бути максимальний ($TLI_{max}$) та середній ($TLI_{av}$) рівні завантаження та дисперсія ($D_{TLI}$), яка характеризує міру нерівномірності завантаження протягом вправи. Їх можна визначити за формулами:

$$TLI_{\max} = \max_{t\in[0;T_{впр}]} TLI(t))$$

$$TLI_{av} = \int_0^{T_{впр}} TLI(t)dt$$

$$D_{TLI} = \int_0^{T_{впр}} (TLI(t) - TLI_{av})^2 dt$$

де $T_{впр}$ – загальна тривалість вправи.

Для опису безупинної, дискретної і сполученої діяльності авіадиспетчера при здійсненні УПР в штатних ситуаціях та у особливих випадках (ОВ) польоту у [13] було використано алгоритмічний підхід. Розроблено алгоритми нормативно-схваленої діяльності авіадиспетчера та обчислено коефіцієнти, що виражають алгоритмічну складність окремих процедур. Даний підхід може бути використаний в комплексі з TLI для адаптації його для оцінки складності вправ на опрацювання вмінь та навичок УПР у ОВ в польоті.

В роботі [14] розглядався вплив на складність УПР таких зовнішніх умов, як:

- перешкоди в ефірі;
- метеорологічні явища;
- неправильна англійська мова пілота і т.і.

За результатами експертного опиту у шести аеропортах США великий рейтинг отримав фактор слабкого знання пілотом англійської мови. Логічно припустити, що в наших умовах фактор мови радіообміну та акценту пілотів матиме великий влив на складність УПР. Потребуються додаткові дослідження для встановлення конкретної залежності та використанні результатів у методі оцінки складності вправи.

## Висновки

Для потреб генерації вправ в контексті реалізації індивідуального підходу до навчання, первинною буде така характеристика вправи, яка являтиме собою багатовимірний вектор,

кожний компонент якого вказує міру застосування у вправі відповідних вмінь та навичок – компонентів моделі суб'єкта навчання. У якості скалярної величини, що дозволить порівняти ці вектори за мірою їх впливу на завантаженість диспетчера доцільно використовувати Traffic Load Index. Розширити область застосування даного показника на особливі випадки у польоті та ведення радіообміну різними мовами можливо з позицій алгоритмічного підходу та після проведення додаткових експериментів.

**Список літератури**


1. *Извалов А.В., Неделько В.Н., Неделько С.Н., Палённый А.С., Сорока М.Ю.* Модели процессов управления качеством подготовки авиадиспетчеров // Радіоелектронні і комп'ютерні системи 7(41). – Харків: "ХАІ", 2009. – С. 89–94.

2. *Cilliers, P.* (1998) Complexity and postmodernism: Understanding complex systems, London: Routledge.

3. *Schaefer, D., Meckiff, C., Magill, A., Pirard, B. & Aligne, F.* (2001). Air traffic complexity as a key concept for multi-sector planning. Presented at the Digital Avionics Systems Conference (DASC) 2001 meeting. Daytona Beach, Florida, USA.

4. *Meckiff, C., Chone, R. & Nicolaon, J-P.* (1998). The Tactical Load Smoother for multi-sector planning. Proceedings of the 2nd FAA/Eurocontrol ATM R&D Seminar. Orlando, Florida., Dec. 1998.

5. *Mogford, R. H., Guttman, J. A., Morrow, S. L., Kopardekar, P.* (1995). The complexity construct in air traffic control: A review and synthesis of the literature (DOT/FAA/-CT TN95/22). Atlantic City, NJ: FAA.

6. *Jonathan M. Histon and R. John Hansman* Mitigating complexity in air traffic control: the role of structure-based abstractions Report No. ICAT-2008-05 August 2008 MIT International Center for Air Transportation (ICAT) Department of Aeronautics & Astronautics Massachusetts Institute of Technology Cambridge, MA 02139 USA

7. *Arad, B.A.* (1964). The controller load and sector design. Journal of Air Traffic Control, May, 12-31.

8. *Schmidt, D.K.* (1978). A queuing analysis of air traffic controllers' workload. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. SMCV-8(6),492-298.

9. *Kopardekar, P.* (2000). Dynamic Density – A Review of Proposed Variables. FAA NAS Advanced Concepts Branch ACT-540: FAA.

10. *Chatterji, G.B.* (1999). Neural network based air traffic controller workload prediction. Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 1999.

11. *Averty et al.* Mental workload in air traffic control: an index constructed from field tests. – CENA, 2004.

12. *Извалов А.В., Неделько В.Н. Неделько С.Н.* Алгоритм автоматизированной генерации упражнений для тренажёра управления воздушным движением. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. Том 3. – Херсон: Видавництво Херсонського державного морського інституту, 2009. – стр. 27 – 29.

13. *Невиніцин А. М.* Прогноз та профілактика помилкових дій авіадиспетчера в особливих випадках польоту. Автореферат дис. канд. тех. наук. – Київ: КМУ ЦА, 1994. – 17 с.

14. *Koros, A., Della Rocco, P.S., Panjwani, G., Ingurgio, V., & D'Arcy, J.F.* (2003). Complexity in Air Traffic Control towers: A field study. Part 1: Complexity Factors. DOT/FAA/CT-TN03/14. Atlantic City, New Jersey: FAA.

УДК: 656.7.022

*С.Н. Коренной*
*(Государственная летная академия Украины, Украина)*

# УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ОТ СТАНДАРТНОЙ ВЕЛИЧИНЫ НА ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМУЮ ВЫСОТУ ПОЛЕТА ВОЗДУШНОГО СУДНА

*В статье поднимается вопрос совершенствования методов предоставления метеорологической информации. Предлагается предоставление информации о предельно допустимой высоте полета воздушного судна, с учетом полетного веса и прогностической температуры на эшелоне полета, на рабочем дисплее диспетчера УВД.*

С увеличением объема и интенсивности воздушных перевозок возрастает роль всех служб, обеспечивающих полеты, в том числе и службы погоды. В настоящее время метеорологическое обеспечение является неотъемлемой частью безопасного и эффективного осуществления деятельности гражданской авиации [6]. Несмотря на постоянную модернизацию авиационной техники, технического оснащения аэродромов и повышения уровня квалификации авиационных специалистов, зависимость авиации от воздушной среды с годами не уменьшается [1]. Об этом свидетельствуют данные об авиационных происшествиях, причиной которых были погодные условия. Число авиационных происшествий из-за неблагоприятных погодных условий из года в год увеличивается и, в настоящее время, приблизилось к 20% от общего количества авиационных происшествий. Авиационные происшествия, произошедшие из-за того, что не было учтено отклонение температуры воздуха от стандартной атмосферы на эшелонах полета, случались не часто, но их последствия были катастрофическими [4]. Самым ярким примером этого является катастрофа самолета ТУ-154 в районе Донецка. При расследовании этого происшествия было выявлено, что, обходя грозовой фронт в условиях значительного взлетного веса, аномальной температуры воздуха и сильной турбулентности, самолет вышел на срывной режим, превысив максимально допустимый угол атаки. Исходя из этого можно сказать, что одной из главных причин данной катастрофы были сложные метеорологические условия, при которых экипаж не учел влияние положительного отклонения фактической температуры воздуха от стандартной атмосферы, превысил предельно допустимую высоту полета и вошел в плоский штопор. Аналогичный случай произошел с самолетом ТУ-154 в районе населенного пункта Учкудук (Три колодца). Для предотвращения подобных ситуаций необходимо предоставлять информацию о предельно допустимой высоте полета воздушного судна на рабочий дисплей диспетчера УВД.

Рассчитать изменение предельно-допустимой высоты полета ($\Delta H_{пред.доп}$) за счет отклонения температуры от стандартных значений можно по формуле:

$$\Delta H_{пред.доп} = к(t_ф - t_{са}), \quad (1)$$

где:

- $t_ф$ − фактическая температура воздуха на уровне $H_{пред.доп}$;
- $t_{са}$ − температура на уровне $H_{пред.доп}$ в СА;
- к − коэффициент, показывающий на сколько изменится $H_{пред.доп}$ при отклонении температуры от СА на 1°. Для самолетов с ТРД этот коэффициент равен 50м/1° [4].

Предоставление информации о предельно допустимой высоте полета для каждого воздушного судна, согласно типу ВС, полетного веса, эшелона полета и условий погоды можно реализовать путем дополнения информации, предоставляемой в формуляре сопровождения (рис 1). В этом формуляре, рядом с текущим эшелоном полета ВС, предлагается предоставление информации о предельно допустимой высоте полета. Предполагается, что, при запросе экипажем воздушного судна о разрешении набора высоты,

например, при обходе грозового облака, диспетчер, располагая данной информацией, сможет порекомендовать не набирать высоту, а возможно и вовсе возвратиться на аэродром вылета.

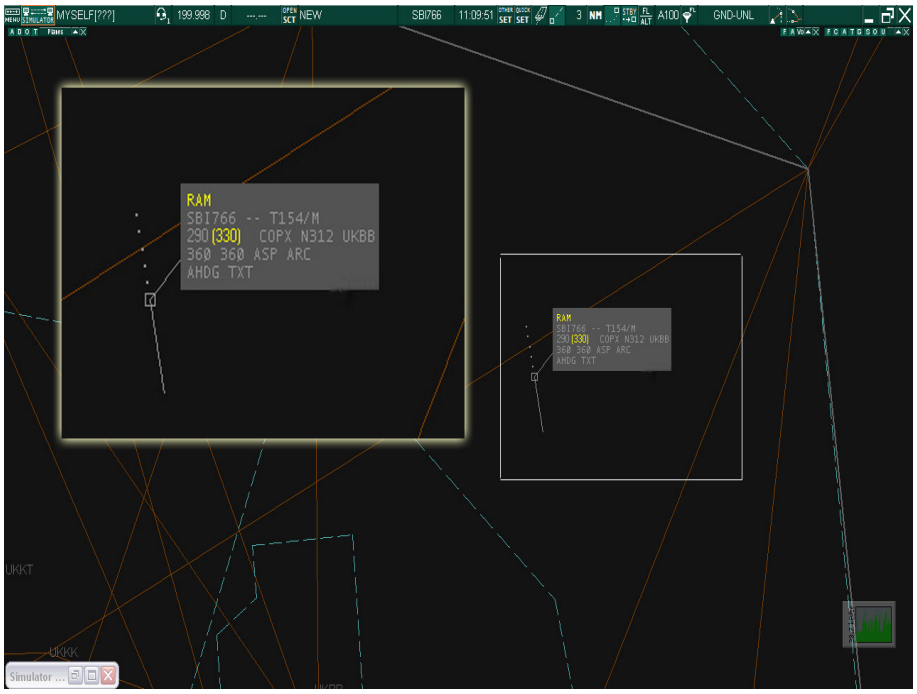



Рис 1. Дополнение информации, предоставляемой в формуляре сопровождения

Для примера, проведем расчеты предельно допустимой высоты полета ВС А310 по маршруту Кишинев-Рим. Для этого используем пакет полетной документации за 28 мая 2009 года, 09.40 UTC. По данным штурманских расчетов вес ВС при взлете составил 130,3 тонны. К концу маршрута, в результате выработки топлива, полетный вес А310 был равен 125,9 тонны. В начале маршрута полет производился на FL360. Температура на эшелоне прогнозировалась -56$^0$С, отклонение от стандартной атмосферы составило + 0,5$^0$С. По маршруту эшелон сменился на FL380, температура на эшелоне прогнозировалась -59$^0$С, отклонение от стандартной атмосферы составило -2,5$^0$С. В конце маршрута температура на эшелоне прогнозировалась -59$^0$С, отклонение от стандартной атмосферы составило так же -2,5$^0$С. Полагаясь на данные, взятые из руководства по летной эксплуатации воздушного судна (рис 2), мы видим, что предельно допустимая высота полета самолета, с учетом прогнозируемой температуры на эшелоне и полетного веса, в начале маршрута находилась на FL390, в конце маршрута – на FL400 (рис 3).

В данном примере на предельно допустимую высоту полета ВС оказало влияние только изменение полетного веса самолета, так как отклонение прогнозируемой температуры от температуры в стандартной атмосфере было незначительно. Если взять климатические данные о максимальной и минимальной температуре воздуха на воздушных трассах, то мы увидим, что в Кишиневе на эшелоне полета максимальная температура может быть равной -43,5$^0$С, а минимальная - -89,5$^0$С. В Риме максимальная температура может быть равной -49,5$^0$С, а минимальная - -80,5$^0$С. Приложив полученные данные к полетному весу воздушного судна А310, мы увидим, на сколько сильно может измениться предельно допустимая высота полета ВС при значительных отклонениях температуры воздуха от стандартной атмосферы. Так, над Кишиневом на эшелоне полета при максимальных значениях температура равна -43,5$^0$С, отклонение от СА равно +13$^0$С, а при минимальной температуре -89,5$^0$С, отклонение составляет -33$^0$С. В конце маршрута при максимальной температуре, равной -49,5$^0$С, отклонение от СА составляет +7$^0$С, а при минимальной температуре, равной -80,5$^0$С, отклонение от СА составляет -33$^0$С. Соответственно, предельно

допустимая высота с учетом полетного веса ВС и максимальных значений температуры воздуха будет расположена на FL370 над Кишиневом и на FL390 над Римом. При минимальных значениях температуры воздуха на эшелоне полета предельно допустимая высота над Кишиневом будет располагаться на FL440, а над Римом на FL430 (рис 3). Исходя из этого мы видим, что, чем больше отклонение температуры воздуха от стандартной атмосферы, тем на более значительную величину будет изменяться предельно допустимая высота полета воздушного судна.

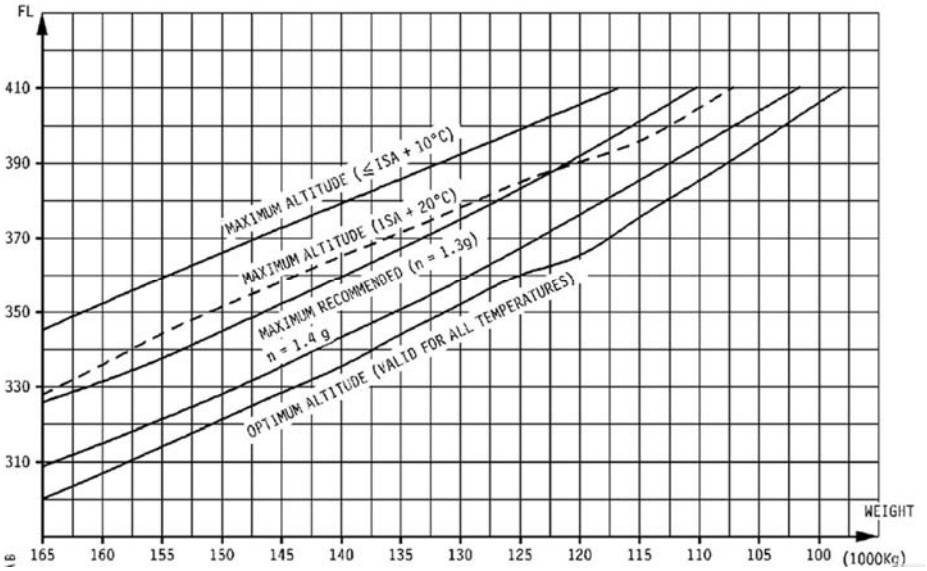



Рис. 2 График определения предельно допустимой высоты полета ВС А310 в зависимости от температуры воздуха и полетного веса

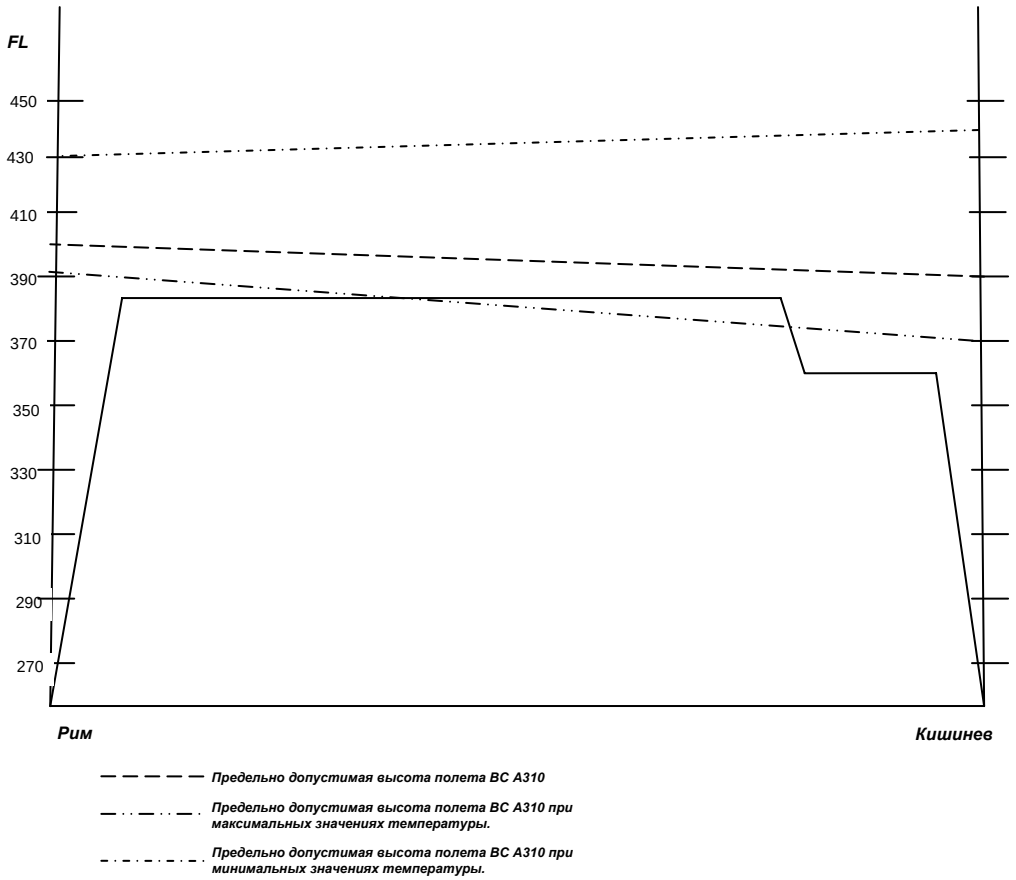



Рис. 3 График изменения предельно допустимой высоты полета ВС А310

## Выводы

Предельно допустимая высота полета рассчитывается для каждого ВС в зависимости от его летно-технических характеристик и зависит от температуры воздуха и полетного веса самолета. В описанном выше случае на предельно допустимую высоту полета оказало влияние только изменение полетного веса самолета, так как отклонение прогнозируемой температуры от температуры в стандартной атмосфере было незначительно. Но, чем больше отклонение температуры воздуха от стандартной атмосферы, тем на более значительную величину будет изменяться предельно допустимая высота полета воздушного судна.

Необходимость использования информации о предельно допустимой высоте полета диспетчером при управлении воздушным движением в сложных метеоусловиях очевидна, так как это повысит безопасность полетов в гражданской авиации.

## Список литературы


1. *Астапенко П.Д. Баранов А.М., Шварев И.М.* Авиационная метеорология. Учебное пособие. – М: Транспорт, 1985. – 262 с.

2. *Баранов А.М., Лещенко Г.П., Белоусова Л.Ю.* Авиационная метеорология и метеорологическое обеспечение полетов. Учебник. – М.: Транспорт, 1993. – 287 с.

3. *Богаткин О.Г., Тараканов Г.Г.* Авиационные прогнозы погоды. Учебное пособие. – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2003. – 164 с.

4. *Лещенко Г.П.* Авиационная метеорология. Учебное пособие. – Кировоград: ГЛАУ, 2009. – 488с.

5. *Маховер З.М., Наровлярский Г.Я., Солонин С.В.* Метеорологические условия на международных воздушных трассах. – Л.: Гидрометеоиздат, 1973. – 218 с.

6. Метеорологическое обеспечение международной аэронавигации. Международные стандарты и рекомендуемая практика. Приложение 3 к Конвенции о Международной гражданской авиации. − Монреаль: ICAO, издание пятнадцатое, июль, 2004.

7. *Наровлянский Г.Я.* Авиационная климатология. – Л.: Гидрометеоиздат, 1968. – 266 с.

8. Порядок прийняття рішення на виліт та приліт повітряних суден цивільної авіації України за правилами польотів за приладами. − Київ: Наказ Державіаслужби України від 28 квітня 2005 р., № 295.

9. Правила метеорологічного забезпечення авіації. − Київ: Наказ Державної служби України з нагляду за забезпеченням безпеки авіації, Міністерства охорони навколишнього природного середовища України, Міністерства оборони України від 14 листопада 2005, № 851/409/661.

10. Унифицированный допуск к аэронавигационному информационному и метеорологическому обслуживанию, связанному с предполетным планированием. – ICAO EUR DOC 010, 2000.

11. *Яковлев А.М.* Авиационная метеорология. Учебное пособие. – Л.: ВАУГА, 1966. – 344 с.

12. DOC 7192-AN/857. Руководство по обучению. Часть F-1. Метеорология для диспетчеров УВД и пилотов. Издание первое. – Монреаль: ICAO, 2002.

13. DOC 9328-AN/908. Руководство по практике наблюдения за дальностью видимости на ВПП и передачи сообщений о ней. Издание второе. – Монреаль: ICAO, 2000. – 85 с.

УДК: 656.7.022

*М.Ю. Сорока (Государственная лётная академия Украины, Украина)*

# ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ТРЕНАЖЁРНОЙ ПОДГОТОВКИ АВИАДИСПЕТЧЕРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РАБОТЫ НА ТРЕНАЖЁРЕ УВД

*Рассмотрена модель построения прогноза уровня тренажёрной подготовки авиадиспетчера по результатам его работы на тренажёре. Применение прогноза с учётом истории тренажёрной подготовки позволит более индивидуально составить упражнения, что, в свою очередь, повысит качество тренажёрной подготовки.*

На фоне постоянно возрастающих объёмов грузовых и пассажирских авиационных перевозок увеличиваются рабочие нагрузки на специалиста по управлению воздушным движением, и, как следствие, выдвигаются новые требования к качеству профессиональной подготовки. Существенное повышение эффективности учебного процесса возможно при внедрении современных информационных технологий, методов анализа и обработки данных по результатам обучения и тренировки авиадиспетчеров на тренажёрах УВД. Особенно интересной представляется возможность автоматизированного прогнозирования уровня тренажёрной подготовки авиадиспетчера. Решение этой задачи позволяет более качественно создавать упражнения для работы курсанта на тренажёре и применить индивидуальный подход в процессе обучения.

В настоящее время в ГЛАУ разрабатывается автоматизированная система управлением качеством подготовки специалистов УВД, в которой предполагается наличие модуля прогнозирования уровня подготовки. Задачей модуля является по истории результатов тренажёрной подготовки спрогнозировать уровень подготовки к следующему занятию на тренажёре.

Рассматривая решение задачи прогнозирования, будем опираться на следующие определения[1,2]:

- прогнозирование – процесс, в котором используется как накопленный в прошлом опыт, так и текущие допущения насчет будущего с целью его определения;
- прогноз – это результат процесса прогнозирования, выраженный в словесной, математической, графической или другой форме суждения о возможном состоянии анализируемого процесса в будущий период времени.

На сегодняшний день существует два основных подхода к решению задачи построения прогноза[3]:

1) восстановление функциональных зависимостей (причинные модели);
2) прогнозирование временных рядов (ВР).

В первом случае, прогнозируемая величина $Y$ представляется как функция от ряда переменных: $Y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n)$, где $x_i, (i \in \overline{1,n})$ – факторы и причины, которые влияют на поведение прогнозируемой величины $Y$. Однако, далеко не всегда можно выявить все внешние и внутренние факторы, влияющие на исследуемый процесс, либо обеспечить функциональную полноту построенного множества факторов для того, чтобы быть уверенным в том, что восстановленная функциональная зависимость даст достоверный прогноз.

Поэтому, при прогнозировании поведения сложных процессов (в нашем случае это процесс приобретения и разрушения знаний, умений и навыков авиационного диспетчера в процессе его обучения и профессиональной деятельности), целесообразно воспользоваться вторым подходом. Этот подход также предполагает восстановление функциональной зависимости, но только от одной переменной. В этом случае прогнозируемая величина представляется как функция от времени – $Y = f(t)$. Таким образом, косвенно учитываются все факторы, влияющие на поведение величины.

При разработке алгоритма работы модуля была предложена следующая схема (Рис. 1).

Данные о результатах работы диспетчера на тренажёре хранятся в специальной базе данных, структура которой была разработана на основе анализа структуры «Рабочей книжки курсанта факультета УВД» и «Книжки диспетчера службы движения гражданской авиации».

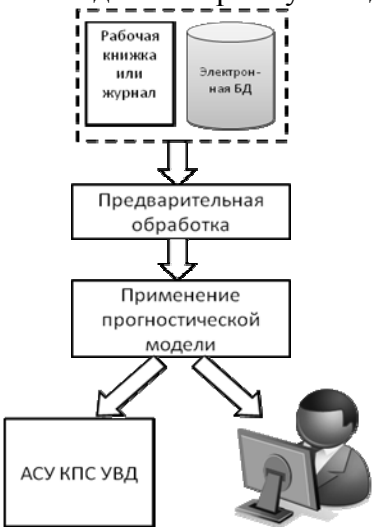



Рис 1. Схема обработки информации для получения прогноза.

Данные о результатах работы диспетчера на тренажёре хранятся в специальной базе данных, структура которой была разработана на основе анализа структуры «Рабочей книжки курсанта факультета УВД» и «Книжки диспетчера службы движения гражданской авиации».

Проанализировав структуру «Рабочей книжки курсанта факультета УВД» были выделены следующие основные объекты:

- курсант;
- инструктор;
- задачи;
- упражнения;
- практические занятия;

А также другие вспомогательные объекты.

Дополнив и расширив перечень объектов и их свойств после анализа «Книжки диспетчера службы движения гражданской авиации» была построена инфологическая модель базы данных (рис 2).

А также был разработан интерфейс доступа к базе данных для инструктора для занесения результатов прохождения тренажёрной подготовки в базу данных.

Далее при работе модуля прогнозирования уровня подготовки на этапе предварительной обработки происходят следующие действия:

- формируется запрос на выборку данных, которые удовлетворяют следующим критериям:
  - заданный курсант;
  - заданное рабочее место;
  - заданная технологическая операция или критерий оценивания;
  - заданный временной промежуток.
- сортировка полученного ряда по дате;
- в выбранных данных определение оценок в течение одного дня и определение их арифметического среднего;
- определение количества дней между занятиями;

В итоге мы получаем временной ряд $X=(x_1, x_2,\ldots,x_n)$, где $x_i$ – оценки по заданной технологической операции или критерию оценивания.

Для построения прогноза с помощью нейронной сети нам необходимо разбить ряд на обучающее и проверочное множество. Как правило, для этого берут следующее

соотношение: 80% - обучающее множество, 20 % проверочное. [4]

Наиболее распространённым для построения обучающей выборки из временного ряда является так называемый «Метод скользящих окон». Метод основывается на теореме Такенса, которая доказывает, что, благодаря отображению запаздывающих координат, из временного ряда можно восстановить модель поведения этой системы (рис. 3).[3]

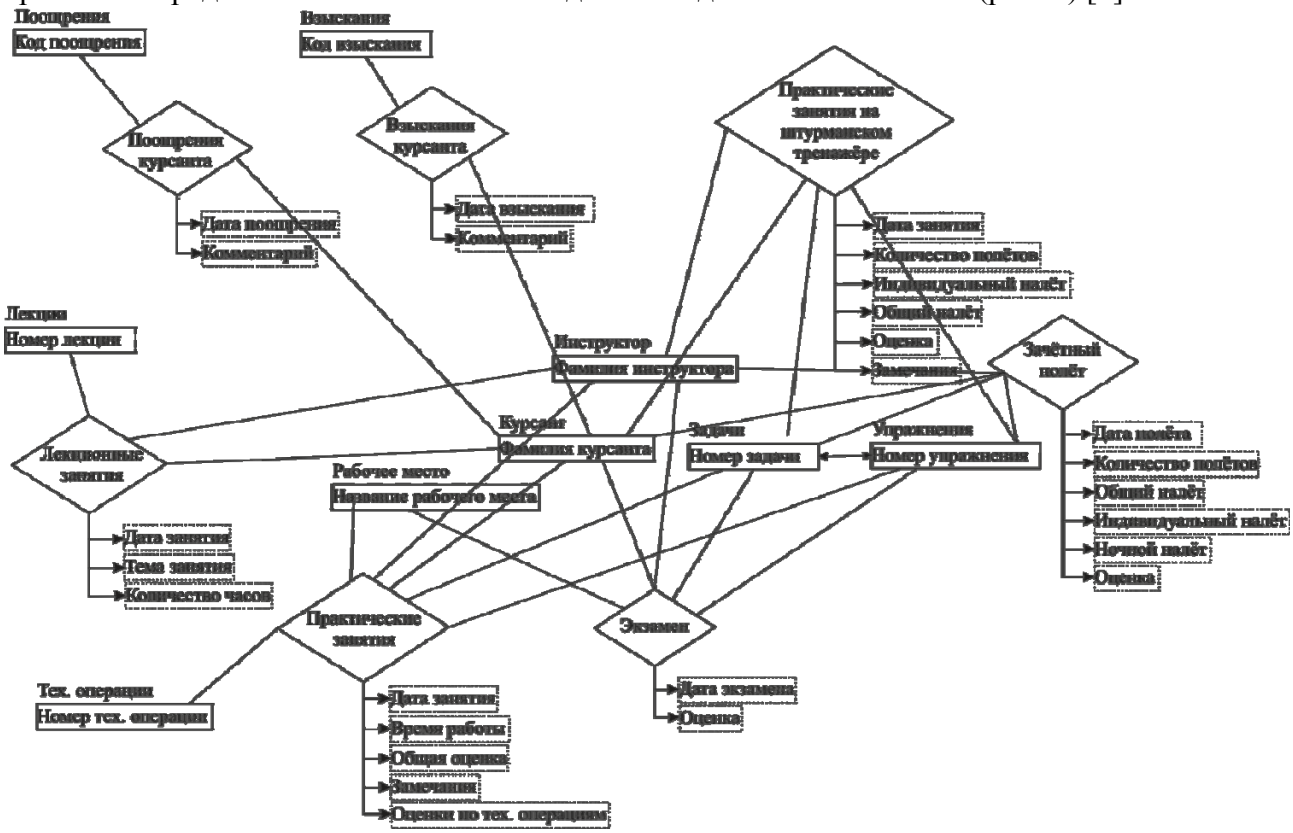
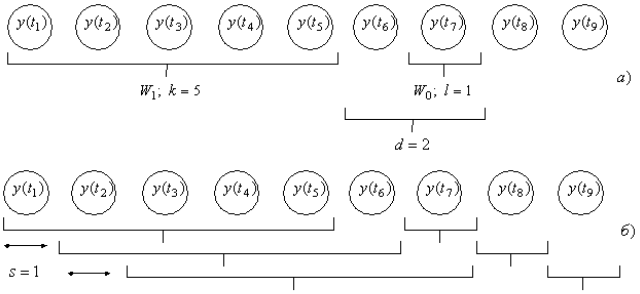



Рис2. Инфологическая модель базы данных хранения истории прохождения подготовки на тренажёже УВД.




| № | $W_1$ | | | | | $W_0$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $y$ |
| 1 | $y(t_1)$ | $y(t_2)$ | $y(t_3)$ | $y(t_4)$ | $y(t_5)$ | $y(t_7)$ |
| 2 | $y(t_2)$ | $y(t_3)$ | $y(t_4)$ | $y(t_5)$ | $y(t_6)$ | $y(t_8)$ |
| 3 | $y(t_3)$ | $y(t_4)$ | $y(t_5)$ | $y(t_6)$ | $y(t_7)$ | $y(t_9)$ |

Рис. 3. Схема, иллюстрирующая "Метод скользящих окон". а) параметры метода; б) передвижение окон по временному ряду (в таблице приведена полученная обучающая выборка).

Для формирования множества обучающей выборки в методе используются два окна $W_1$ и $W_0$ фиксированного размера $k$ и $l$, соответственно, с интервалом $d$, обозначающим период прогнозирования. Эти окна перемещаются, начиная с первого элемента, по

временному ряду исторических данных с некоторым шагом s, обычно равным минимальному шагу ряда. Рассмотрение данных ряда производится через эти окна. Данные, находящиеся в окне $W_1$, описывают распознаваемую ситуацию и задают для нейронной сети вектор входных значений $\mathbf{X}$. Данные, находящиеся в окне $W_0$, определяют значение прогноза и задают для сети вектор эталонных выходных значений $\mathbf{Y}$. Каждый следующий набор получается в результате сдвига окон $W_1$ и $W_0$ вправо на шаг s. Размера окна $W_0$ и период прогнозирования $d$ обычно выбираются равными 1.

Для работы с временным рядом оценок нами были выбраны следующие параметры: $k$=5; $l$=1; $d$=1; s=1.

Из нейронных сетей для решения задачи прогноза наилучшие качества показывает гетерогенная сеть, состоящая из скрытых слоев с нелинейной функцией активации нейронных элементов и выходного линейного нейрона.

Использовав аналитический пакет «Statistica» для подбора наилучшей структуры нейронной сети для решения нашей задачи, амии была получена нейронная сеть, в которой есть один скрытый слой с тремя нейронами.[5]

Результаты применения нейронной сети для построения прогноза дал среднеквадратическую ошибку в 0,003 (рис 4).

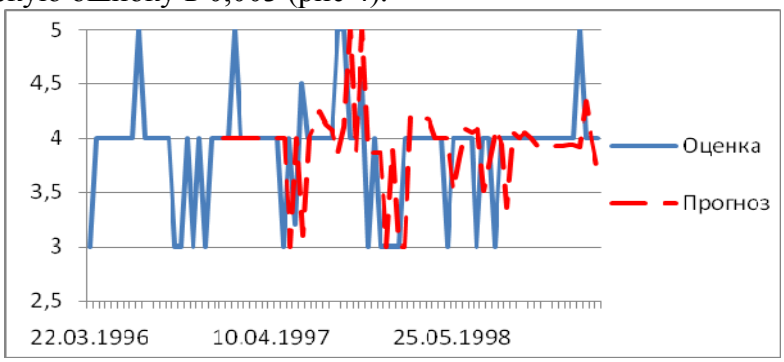



Рис. 3 График прогноза оценки.

## Выводы

Прогноз, составленный с помощью предложенной модели имеет высокую точность, а это значит, что модуль прогнозирования можно успешно применять для составления прогноза уровня подготовки авиационного диспетчера по результатам работы на тренажерах УВД для более качественного составления упражнений. Реализованный таким образом индивидуальный подход в тренажёрной подготовке авиадиспетчеров, в свою очередь, повысит качество подготовки диспетчера и улучшит безопасность на авиационном транспорте.

## Список литературы

1. *Бриллинджер Д.* Временные ряды. Обработка данных и теория. / Пер. с англ. Белинского А.В. и Журбенко И.Г. – М.: Мир, 1980. – 536 с.

2. *Назаров А.В., Лоскутов А.И.* Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем. – СПб.: Наука и Техника, 2003. – 384 с.

*3. Олешко Д.Н.* Информационная технология ускорения синтеза нейронных сетей для решения задач прогнозирования при принятии решений:диссертация на соискание научной степени к.т.н. - Одесса, 2005 - 162 с.

*4. Э.Е. Тихонов.* Методы прогнозирования в условиях рынка: учебное пособие. - Невинномысск, 2006. - 221 с.

5. *А.А. Халафян* STATISTICA6. Статистический анализ данных. 3-е изд. Учебник - М.: ООО "Бином-Пресс",2007г. - 512с.:ил.

6. *Шибанов Г.П.* Количественная оценка деятельности человека в системах человек-техника. - М.: Машиностроение 1983. - 263с., ил.




Наша адреса: 03680, Київ-058,
проспект Космонавта Комарова, 1, кім. 1-238
тел.: (044) 406 7212
факс: (044) 406 7212
e-mail: vtnik@nau.edu.ua
http://www.nau.edu.ua