

*Г.Л. Баранов, д.т.н.  
(ДП "Центральний науково-дослідний інститут навігації та управління"),  
В.І. Тарасюк  
(Київська державна академія водного транспорту  
ім. Гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Україна),  
С.М. Васько  
(Національний транспортний університет, Україна)*

## **МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ НА ОСНОВІ СИМВОЛЬНИХ ТЕЙЛОРОВСЬКИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ**

*Розроблено метод символного моделювання руху ВТЗ з використанням типових шаблонів двобічних перетворень академіка Г.Є. Пухова, які забезпечують швидку адаптацію до змін у навколишньому середовищі*

Складні динамічні системи (СДС) характеризуються не лише великою розмірністю їх складових, а й насамперед значним варіюванням та зміною функціональної поведінки. У поточних ситуаціях вплив факторів внутрішнього та зовнішнього середовища, складність яких майже необмежена, залежить від змін у силовому та моментному балансі. Вимоги до сучасних систем навігації й управління рухом високошвидкісних транспортних засобів (ВТЗ) зростають [1]. Саме це вимагає оперативно враховувати нові швидкоплинні суттєві обставини впливу різноманітних фізичних об'єктів, тобто своєчасно адаптуватись до реального простору, наявних ресурсних обмежень [2] та збурень навколишнього середовища.

Різнорамітне та широке застосування мікроелектроніки та мікропроцесорів як на борту ВТЗ, так і на диспетчерських центрах транспортних інформаційно-управляючих систем (ДЦ ТІУС) здійснюється з урахуванням реальних обмежень на обчислювальну потужність, пропускну здатність апаратури, а також ефективну складність алгоритмів, інформаційно-аналітичного забезпечення (ІАЗ), конкретного програмно-апаратного комплексу (ПАК). Традиційні принципи моделювання ВТЗ шляхом чисельної обробки потоків часових рядів не задовольняють сучасним вимогам щодо гарантування безпеки життя, надійності безаварійного управління ВТЗ, ефективності транспортної роботи в екстремальних умовах [3]. Це наслідок значного зростання часових інтервальних обмежень при великих порядках складності об'єктів.

Обчислювальний інтелект на базі систем комп'ютерної алгебри (СКА) може в більшій мірі підвищувати необхідну ефективність алгоритмів ПАК ВТЗ та ДЦ ТІУС ніж традиційний шлях підвищення швидкодії комп'ютерів разом з зростанням їх вартості для інтелектуальних транспортних систем (ІТС) [4].

Розробка методології моделювання руху ПАК ВТЗ, що взаємодіють з ДЦ ТІУС та іншими інтелектуальними агентами системи (ІАС) у межах ІТС на базі єдиних засобів СКА [2] для прискорення моделювання процесів запобігання аварій.

Функціонування безперервних та дискретних компонентів СДС моделюємо у пам'яті ПАК ВТЗ. Часткові моделі визначені диференціальними, різницевиими, алгебраїчними нелінійними системами рівнянь. Визначальні змінні залежать від параметрів простору та часу. Функції-оригінали характеризують дійсні алгебраїчні функції, які єдиним чином дозволяють відображати певну множину точок у просторі існування. Відомі процедури лінеаризації не забезпечують адекватності таких моделей об'єктам, фізичним явищам. Підвищення точності та розширення області моделювання нелінійних процесів й об'єктів запропоновано на основі символних тейлоровських перетворень [6-7]. За допомогою засобів СКА здійснюємо символні перетворення з області оригіналу у область алгебраїчних зображень. Функція-зображення є алгебраїчною, але новою функцією, яка залежить від нової змінної у дискретному просторі.

Нова область зображень характеризується функціональною залежністю нових змінних від цілочисельного аргументу  $K = 0, 1, 2, 3 \dots N$ , що призводить до рекурентних залежностей або ітеративних процедур.

У просторі зображень зберігаємо усі суттєві нелінійності та алгебраїчно розв'язуємо поточну конкретну задачу (ідентифікації, оптимізації, навігації, управління, тощо). Потім зворотнім перетворенням з використанням термінальних значень параметрів, які апаратно (засобами ПАК) вимірюють, отримуємо розв'язки задач у символній (алгебраїчній) формі у області оригіналу. Отримані нелінійні просторово-часові залежності далі можливо безпосередньо використовувати у експлуатаційних режимах real-time високоточного функціонування СДС з інтервалами прогнозування у прискореному часі.

Сучасні системи управління ВТЗ базуються на методах чисельного розв'язку оперативних задач руху об'єктів в СДС, які охоплюють навколишнє середовище та його стохастичні впливи на контактні зони ВТЗ, включаючи інші рухомі об'єкти у зоні спільного просторово-часового континуума.

В експлуатаційних умовах параметри контактної зони під впливом дії навколишнього середовища суттєво змінюються та варіюються. В наслідок цього виникають відхилення між програмними траєкторіями та фактичним збуреним рухом. Такі відхилення компенсуються системою управління на традиційних принципах автоматичного керування ВТЗ в СДС.

В умовах природної невизначеності стосовно змін параметрів контактної зони (аеродинамічний опір, сили тертя, кути нахилу рельєфу, радіуси поворотів, загрознає наближення об'єктів та ін.) моделі для розв'язку задач керування стають неадекватними. Тому частіше виникають значні (небажані) відхилення. Своєчасно незавершена процедура адаптації бортових багатофункціональних комплексів (ББК) ВТЗ часто є причиною аварійних подій зі значними збитками.

Повна базова розрахункова модель перехідних процесів має суттєві нелінійності, логіко-динамічні переключення за ситуаціями та багато емпіричних коефіцієнтів, які розраховують за відповідними програмами у режимах on-line.

Суттєве ускладнення розрахункових моделей для ББК приводить до неможливості оперативного їх використання в контурі керування. Обчислювальна складність розв'язку оперативних задач в режимах real-time не повинна перевищувати властивостей ББК та його програмно-апаратного комплексу (ПАК), які гарантують якість керування в наслідок не перевантаження за критеріями пропускну здатності ПАК. Швидкість перетворень вхідних сигналів у вихідні сигнали закону управління робочими органами та відповідними приводами ВТЗ забезпечує ефективність своєчасного маневрування.

Нова парадигма полягає у перетворенні існуючих ББК в прогресивні засоби гарантованого адаптивного управління (ГАУ) ВТЗ. Суттєві обмеження на обчислювальну складність можливо задовольнити шляхом застосування у контурі адаптації символних перетворень. За рахунок алгебраїзації інформаційно-аналітичного забезпечення (ІАЗ) ПАК оперативно відслідковується адаптивність розрахункових моделей та їх обчислювальна ефективність безпосередньо у режимах real-time ГАУ рухом ВТЗ.

Завдяки символним перетворенням методи, ІАЗ та засоби ГАУ дозволяють розв'язувати задачі оптимізації руху ВТЗ в СДС за багатьма критеріями з конфліктуєчими властивостями. Наприклад. Людино-машинний інтерфейс повинен бути адаптований до конкретного водія та його навичок. Режим роботи двигуна адаптується до умов транспортної роботи в СДС. Виконавчі органи та силові приводи керування адаптуються до змінних умов довкілля у контактній зоні. Засоби ГАУ ВТЗ адаптуються до змінних умов середовища та транспортного потоку у зоні спільного руху. Загалом планове завдання на транспортне перевезення повинно бути прибутковим в умовах конкуренції.

Єдність символних перетворень та взаємозалежності між частковими моделями забезпечує наскрізну алгебраїзацію ІАЗ ПАК ВТЗ. В наслідок цього ГАУ рухом ВТЗ отримує синергетичний ефект за необхідними критеріями якості, безпеки руху та економічної ефективності використання витратних ресурсів в складному організаційно-технологічному

комплексі транспортної галузі.

Проблема безпеки руху значно ускладнюється при урахуванні впливу негативних факторів навколишнього середовища, в тому числі і погодно-кліматичних. Тому задачі моделювання складних динамічних об'єктів і фізичних процесів вимагають обробки великих обсягів інформації в реальному і прискореному часі.

Пропонується методика аналітичного моделювання ВТЗ з використанням шаблонів-типових формальних моделей. Для прикладу, розглядається динаміка процесів, які відбуваються під час руху ВТЗ, у підсистемі <двигун – трансмісія>. Дана підсистема є базовою майже для всіх ВТЗ.

Відомо, що універсальних методів розв'язання нелінійних диференціальних рівнянь не існує [7]. Але метод академіка Пухова Г.Є. [5-7] дозволяє алгебраїзувати нелінійну задачу. Метод передбачає перехід від початкових рівнянь в області оригіналу, що характеризують залежності від  $t$ -часу, до області зображень. Там усі параметри, що змінюються, залежать від  $k$ -цілочисельного аргументу дискретного простору.

Моделювання складних задач більш простими задачами, рішення яких еквівалентно вихідній задачі, називається квазіаналоговим моделюванням [5]. Цей напрямок моделювання також запропонований у працях академіка Пухова Г.Є. Ним же запропоновані Р-перетворення. Даний метод, на відміну від відомих інтегральних перетворень Лапласа і Фур'є, заснований на переводі оригіналів у область зображень за допомогою операції диференціювання. При математичному моделюванні фізичних об'єктів і процесів, що описуються диференціальними й інтегральними рівняннями, Р-перетворення дозволяють замінити операції інтегрування і диференціювання еквівалентними алгебраїчними операціями.

Після аналітичного застосування алгебраїчних методів дослідження стану фізичних об'єктів і процесів у просторі Р-зображень, повертаємось до області оригіналу, де і використовуємо чисельні процедури.

Базові Р-перетворення мають функціональний вигляд [5-7]:

$$\underline{X}(k) = \underline{x}(t) = \frac{H^k}{k!} \left[ \frac{d^k x(t)}{dt^k} \right]_{t=0} \quad \underline{\cdot} \quad \underline{x}(t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \left( \frac{t}{H} \right)^k X(k), \quad (1)$$

де  $x(t)$  – оригінал, що являє собою безперервну, диференційовану нескінченне число разів, і обмежену разом із всіма своїми похідними функцію дійсного аргументу  $t$ ;

$X(k)$  і  $\underline{x}(t)$  – рівноцінні позначення Р-зображення, що представляє дискретну (гратчасту) функцію цілочисельного аргументу  $k = 1, 2, 3, \dots$ ; (далі нижче підкреслення позначає, що над даною функцією виконуються відповідні Р-перетворення);

$H$  – масштабна постійна, яка має розмірність аргументу  $t$  і часто обирається рівною відрізка  $0 \leq t \leq H$ , на якому розглядається функція  $x(t)$ ;

$\underline{\cdot}$  – символ відповідності оригінала  $x(t)$  його Р-зображенню у формі  $X(k)$ .

Р-зображення  $X(k)$  відображають рекурентні значення при конкретному обраному аргументі  $k$  й тому називаються дискретами. Наприклад,  $X(0)$  – нульова дискрета,  $X(1)$  – перша дискрета,  $X(2)$  – друга дискрета і т. ін. у дискретному спектрі [7].

Вказаний вище підхід дозволив виконати аналітичні перетворення для підсистеми <двигун – трансмісія> ВТЗ. Результати зведено у таблицю відповідностей.

Логічна схема алгоритму з типових шаблонів змінюється подібно ситуації у СДС.

Інтегральні особливості руху ВТЗ полягають у тому, що темп зміни режимів руху залежить від індивідуальних якостей водія. Наприклад, на темп зрушення ВТЗ з місця впливає реакція водія та рух педальей привода муфти зчеплення і подачі палива.

Закони переміщення педальей подачі палива  $h(t)$  і переміщення педальей привода муфти зчеплення  $H(t)$  є основними: для підсистем <двигун> і <зчеплення>. Вихідним параметром

підсистеми <двигун> є частота обертання колінчатого вала двигуна  $\omega_{\text{де}}(t)$  і його крутний момент  $M_{\text{де}}^{\kappa}(t)$ . Для підсистеми <зчеплення> вихідним параметром є осьова сила нажимного диска  $P_n(t)$ , та момент тертя муфти зчеплення  $M_{\text{сч}}(t)$ . Для підсистеми <двигун–трансмсія> вихідним параметром є крутний момент  $M_{\kappa}$  на привідних колесах ВТЗ. Функція  $M_{\text{де}}^{\kappa}[\dot{\phi}_{\text{де}}, h(z_p)]$  є заданою характеристикою двигуна. Залежність переміщення рейки подачі палива від параметра  $h_n(t)$  повинна бути плавною, монотонною і однозначною. Ця залежність, функція  $M_{\text{де}}^{\kappa}[\dot{\phi}_{\text{де}}, h(z_p)]$  і згадана вище система рівнянь описують залежність сил, які діють на ВТЗ від переміщення  $h_n(t)$  згідно з законом руху на ділянці ТДК у поточних ситуативних погодних умовах.

Наведена вище комплексна аналітична модель адекватно описує рух ВТЗ по дорозі з плавним рельєфом, тобто в умовах міста чи автострад. При моделюванні руху дорогою із суттєвими нерівностями необхідно мати додаткову інформацію про рельєф дорожньої поверхні такої ділянки ТДК.

Запропонована комплексна модель є основою для створення програмного забезпечення, яке дозволяє у реальному та прискореному часі управляти рухом ВТЗ. У подальшому доцільно реалізувати дану аналітичну модель на звичайних засобах обчислювальної техніки, що не вимагає високої продуктивності для переробки великих обсягів інформації в реальному часі.

### Висновки

1. Запропоновані методи символічної комп'ютерної алгебри, які для інтелектуальних транспортних систем (ITS) здатні збільшувати необхідну ефективність алгоритмів ПАК ВТЗ та ДЦ ТІУС, не вимагають підвищення швидкодії комп'ютерів разом з зростанням їх вартості, що здійснюється у випадках традиційних методів моделювання.
2. Наведені приклади двобічних аналітичних перетворень, які забезпечують відповідність між континуальними рівняннями в області оригіналу та дискетами простору станів області зображень, де здійснюються системні погодження варіювання СДС.

### Список літератури

1. Баранов Г.Л. Структурное моделирование сложных динамических систем / Г.Л. Баранов, А.В. Макаров. – К.: Наукова думка, 1986. – 272с.
2. Льюггер Д.Ф. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем / пер. с англ. – М.: изд. дом «Вильямс», 2005, – 864с.
3. Баранов Г.Л. Телекомунікаційні технології на транспорті: Навч. посіб. / Г.Л. Баранов, П.Р. Левковець. – К.: НТУ. 2007. – 448 с.
4. Пржибыл П. Телематика на транспорте / Пржибыл П., Свитен М.; пер. с чешского С. Бузека, В. Бузковой.; под ред. проф. В.В. Сильянова – М.: МАДИ (ГТУ), 2003. – 540с.
5. Пухов Г.Е. Преобразования Тейлора и их применение в электротехнике и электронике. / Пухов Г.Е. – К.: Наукова думка, 1978. – 286 с.
6. Пухов Г.Е. Дифференциальные преобразования функций и уравнений / Пухов Г.Е. – К.: Наукова думка, 1980. – 419 с.
7. Пухов Г.Е. Дифференциальные спектры и модели / Пухов Г.Е. – Киев: Наукова думка, 1990. – 184с.