

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІДТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВОГО РУХУ
ВИКОНУЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ РОБОТОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

Запропоновано нові підходи до організації керування виконуючими елементами спеціалізованих робототехнічних систем, які дозволили одержати покращені динамічні та енергетичні показники процесу відтворення складного просторового руху. Проведені аналітичні дослідження варіантів реалізації систем керування двигунами постійного струму. Наводяться результати порівняльного аналізу запропонованих структур.

Сучасні робототехнічні системи оснащені різноманітними виконуючими елементами та механізмами, призначеними для забезпечення просторових переміщень як спеціалізованого інструмента, так і самого об'єкта маніпулювання. В ряді випадків до систем керування рухом пред'являються надзвичайно високі вимоги з точності відтворення просторового руху, наприклад в медицині, мікроелектроніці, інше. Досягнути позитивних результатів вдається завдяки мінімізації габаритів, підвищенню динамічних характеристик, енергетичної ефективності, надійності створюваних систем. Шляхи розв'язання даної задачі розробляються вже давно [1-3], досягнуто значних успіхів, але можливості відшукання нових рішень з підвищення точності відтворення просторового руху виконуючих елементів робототехнічних систем далеко не вичерпані.

Виконання позначених вище вимог з компактності, точності та енергетичної економічності визначає вибір способу керування електричними двигунами робототехнічних комплексів на користь широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) напруги живлення. Вибираючи частоту управління f з умови $f > 1/2\pi T_e = r/2\pi L$, де r – активний опір обмотки, L – індуктивність, $T_e = L/r$ – постійна часу обмотки (її ще називають електромагнітною постійною на відміну від електромеханічної T_m), можна одержати той же самий результат у формуванні струму в обмотках, що й при управлінні неперервним струмом. При цьому додатково істотно скорочуються втрати енергії в електронній частині, оскільки остання працює в ключовому режимі.

Реалізація систем частотного управління двигунами змінного струму, як правило трифазними, досить складна, оскільки містить виконаний за мостовою схемою напівпровідниковий інвертор, для керування яким застосовуються спеціалізовані контролери. У випадку управління двигунами постійного струму задача вирішується значно простіше, проте різноманітність можливих підходів до організації управління є набагато ширшою.

Розглянемо кілька можливих підходів до організації ШІМ-управління.

1. Управління знакозмінною напругою, що набуває форми меандру в нейтральному стані. Частота обирається достатньо високою $f \gg r/2\pi L$.

2. У нейтральному стані обмотка двигуна закорочена, при появі команди до обмотки прикладається напруга відповідної полярності на час, пропорційний величині команди. Даний режим в порівнянні з попереднім є більш прийнятним для двигуна з погляду можливих перевантажень (електричних і теплових), допускає зменшення частоти ШІМ навіть нижче за $1/T_e$.

Обидва зазначені режими характеризуються збереженням початкової постійної часу формування струму завдяки безперервно підключеній обмотці до джерела напруги з низьким імпедансом. Результуючий струм в черговому такті ШІМ є величиною інтегральною, залежною від передісторії в попередніх тактах. Пульсації струму відіграють позитивну роль в подоланні сухого тертя в підшипниках і редукторі. З енергетичної точки зору перший

режим є небажаним, в другому ж режимі можна досягти певного компромісу, створивши достатньо інтенсивно пульсуючий момент без небезпечних теплових перевантажень обмотки навіть при низькому середньому моменті на валу. Обидва варіанти є лінійними системами, в яких середній струм встановлюється пропорційно значенню керуючого сигналу автоматично, що забезпечується алгоритмічно.

3. Наступний режим не є типовим при побудові ШІМ-управління двигунами. В циклі живлення двигуна формується вимушена пауза для переведення обмотки в стан холостого ходу (ХХ) з метою вимірювання ЕРС обертання, пропорційної фактичній швидкості двигуна. Природно, що тепер період ШІМ повинен перевищувати постійну часу обмотки, оскільки гарантоване припинення струму в обмотці від початку блокування може відбуватися тільки по закінченні часового проміжку, співрозмірного з T_e . Ситуація ускладнюється у випадку реверсу на великих швидкостях з практично подвійним струмом – тоді час згасання струму стає ще більшим. Але, оскільки в більшості виконуючих елементів потреби в перевищенні при наймі половини максимальної швидкості не виникає, період блокування може бути вибраний з близьким до T_e . Більша частина періоду ШІМ відводиться для формування струму в обмотці, завдяки чому забезпечення пускового струму в обмотці цілком можливе. Але закон регулювання тривалості імпульсів ШІМ при введенні примусової паузи стає нелінійним. Кожного разу, перериваючи струм на час блокування, ми втрачаємо передісторію струму в попередніх періодах. Тому середній струм і середній момент на валу не будуть пропорційними простому середньому значенню керуючого ШІМ-сигналу, а визначатимуться нелінійним характером процесу зростання струму на початковій ділянці періоду, порівняній з постійною T_e .

Зупинимося на двох різних варіантах реалізації третього режиму.

В першому випадку в робочій частині періоду ШІМ формується ділянка підключення джерела до двигуна тривалістю, пропорційною керуючій команді, після чого слідує коротке замикання (КЗ) аж до початку примусового блокування. При малих командах середній струм на ділянці зростання пропорційний квадрату ширини імпульсу, а на ділянці КЗ визначається досягнутим значенням струму, яке прямо пропорційне ширині імпульсу. При збільшенні керуючої команди експоненціальна ділянка затухаючого струму стикається з ділянкою блокування, внаслідок чого утворюється злам модуляційної характеристики, який негативно позначається на якості роботи приводу. Основною особливістю режиму є те, що при малих командах струм і обертаючий момент формуються у вигляді сплесків з крутим фронтом і експоненціальним спадом з фіксованою постійною часу та амплітудою, пропорційною керуючій команді.

В іншому варіанті, на відміну від попереднього, повністю відсутній режим КЗ. Друга ділянка циклу замінюється ХХ, що позначається на лінійності модуляційної характеристики. Тепер при малих командах закон зміни струму набуває лише трикутної форми: тривалості зростання струму при підключенні джерела і спадання після його блокування практично співпадають. Середній струм стає пропорційним квадрату ширини імпульсів, а значить і квадрату керуючої команди. Для лінеаризації модуляційної характеристики потрібне застосування компенсуючого параболічного закону управління шириною імпульсів на початковій ділянці, що і реалізується в запропонованій системі.

Відзначимо відмінності останнього режиму “пуск” – “холостий хід” від попереднього варіанту. За умови узгодженої лінеаризації характеристики при малих командах в обмотці формується струм у вигляді трикутних імпульсів з крутими фронтами і спадом, набагато коротших в порівнянні з більш тривалими експоненціальними імпульсами з таким же середнім значенням та значно більшою амплітудою, ніж у першому випадку. Теоретично це є найменша за тривалістю і найбільша за амплітудою порція моменту, яку можна одержати для заданого середнього моменту від наявного джерела живлення. Пульсації моменту з максимально збільшеною амплітудою при тій же тактовій частоті і підтримці того ж середнього моменту дають найбільший ефект в подоланні сухого тертя, що при малих

швидкостях забезпечує плавність ходу і завдяки цьому вищу точність руху виконуючого елемента.

До переваг останнього варіанту модулятора можна віднести й те, що він стає нечутливим до поточної швидкості обертання валу, а це свідчить про збільшення астатизму системи на один порядок. Кожного разу, підключаючись до двигуна і потім залишаючи його на холостому ходу, ми надаємо останньому відповідну порцію енергії, коректуючи швидкість обертання. Якщо необхідності в корекції останньої немає, управляюча команда дорівнює нулю і двигун продовжує обертання з незмінною швидкістю, залишаючись готовим до чергової корекції. У попередньому ж випадку подача нульової команди призвела б до закорочування обмотки двигуна і він мав би зупинитися по експоненті відповідно до своєї механічної постійної часу T_m . Таким чином, останній режим енергетично вигідніший, забезпечує більш шадний режим роботи двигуна, зменшуючи нагрів обмотки.

Ще зауваження на користь алгоритмів ШІМ з перериванням струмів. Якщо за відсутності блокування середнє значення струму визначається ще і передісторією зміни струму в декількох попередніх тактах, то у разі переривання струму спостерігається однозначна повторюваність струмової картини (при постійній команді) і повна незалежність поточного такту від попереднього. І, якщо в першому випадку для розширення смуги струмового контура потрібне введення зворотного зв'язку, то в другому така необхідність виключається, оскільки алгоритмом такого режиму вже забезпечена автоматична параметрична компенсація постійної часу струмового контура.

Другий варіант модулятора нечутливий до поточної швидкості обертання валу, що свідчить про збільшення астатизму системи на один порядок. У цьому режимі забезпечується й більш шадний тепловий режим роботи двигуна.

На діаграмі рис. 1, а показані результати розрахунку залежності середнього і пікового значень струмів в обмотці двигуна від ширини імпульсів ШІМ для обох варіантів реалізації модулятора. Залежність середнього струму для варіанту з КЗ лінійна практично до максимальних значень управляючої команди. Характеристика варіанту з ХХ містить параболічну ділянку при малих тривалостях імпульсу ШІМ.

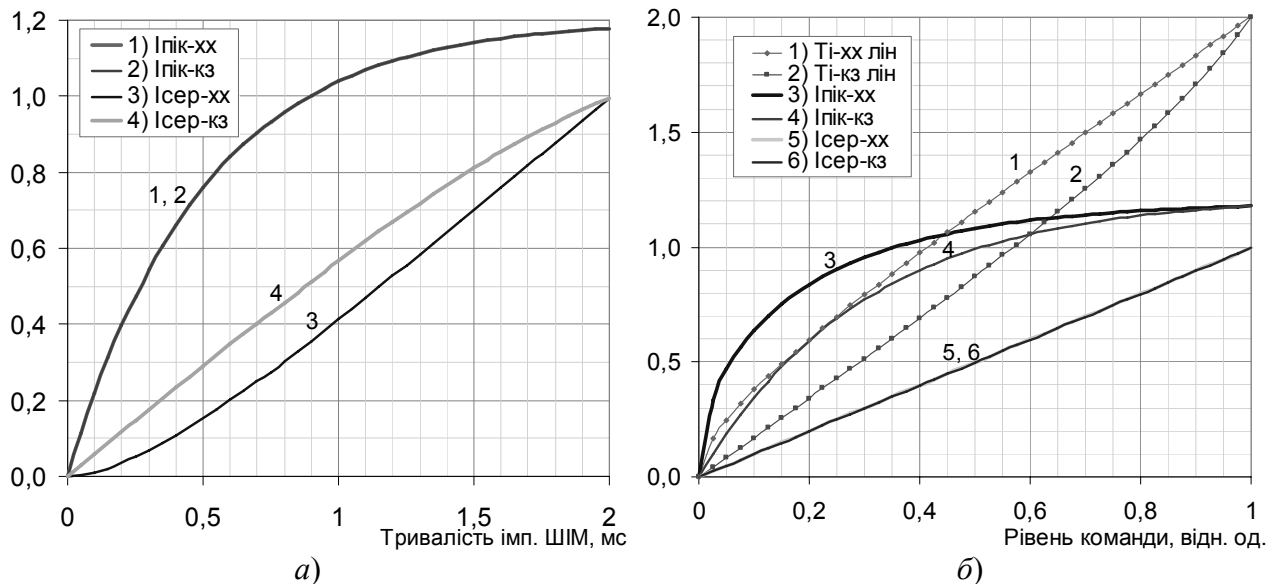


Рис 1. Залежність середнього та пікового значень струму від ширини імпульсів ШІМ (а) та відносного рівня команди (б)

Важливим є співвідношення пікового та середнього за період значень струму. Зробити висновок про модуляційні властивості варіантів дозволяє представлення тієї ж моделі в інших координатах (рис. 1, б). Обидві характеристики лінеаризовано відносно управляючої команди, а кривими 1 і 2 показано, як повинна змінюватися ширина імпульсів для здійснення такої лінеаризації. Тепер криві 3 та 4 для пікового значення струмів розійшлися і дають наочне уявлення про переваги останнього варіанту в забезпеченні більшого пікового струму

при одному і тому ж середньому. Ця відмінність найкращим чином виявляється в області малих сигналів, де формування значних пікових обертальних моментів особливо важливе для подолання тертя. Виконаємо оцінку співвідношення імпульсного і середнього моментів для одного і того ж значення останнього при різних способах управління, умовно прийнявши поріг тертя на рівні 0,1 від пускового моменту. Очевидно, що для подолання сил тертя при живленні постійним струмом знадобиться команда в 10% від максимальної. В варіанті ШІМ з КЗ ми спостерігаємо значення команди, здатної подолати тертя, на рівні 2,5% від максимальної, а для варіанту ШІМ з ХХ цей показник знижується до 0,2% (тобто у 8 разів).

На діаграмах рис. 2 представлено результат параметричної лінеаризації крізної модуляційної характеристики приводу з ШІМ з ХХ для двох різних значень постійної часу T_e та різних параметрів компенсатора. Нестабільність крізної диференціальної крутизни не перевищує $\pm 10\%$ від її середнього значення, інтегральна ж крутизна (відношення середнього обертаючого моменту до значення керуючої команди) виявляється ще більш постійною в усьому діапазоні команд.

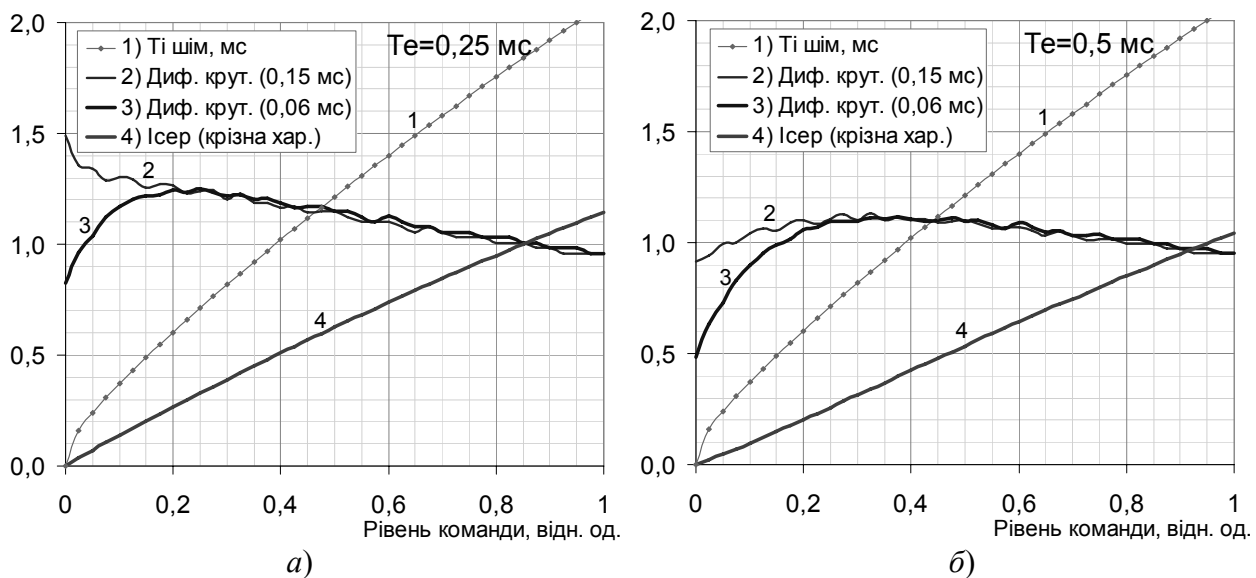


Рис.2. Крізна модуляційна характеристика лінеаризованих модуляторів для різних значень електромагнітної постійної часу T_e

Нестабільність диференціальної крутизни крізної характеристики не перевищує 10%, а коефіцієнт, визначений як відношення середнього обертаючого моменту до керуючої команди, ще більш постійний в усьому діапазоні команд.

Висновки. Зазначеними підходами не вичерпуються можливості підвищення точності відтворення просторового руху виконуючих елементів робототехнічних систем, у тому рахунку і з приводами на основі ШІМ. Предметом подальших досліджень може бути пошук способів адаптивного подолання впливу тертя та змінних навантажень за рахунок розробки нових більш ефективних алгоритмів.

Список літератури

1. Тимофеев А. В. Адаптивные робототехнические комплексы. / Тимофеев А. В. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988. – 332 с.
2. Мирошник И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. – СПб.: Наука, 2000. – 549 с.
3. Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Уч. пособ. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 464 с.