

УДК 681.5 (045)

О.І. ОСМОЛОВСЬКИЙ*Національний авіаційний університет, Україна***СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЧУТЛИВОСТІ ПРЕЦИЗІЙНИХ
КООРДИНАТНИХ ПРИВОДІВ**

Виконано короткий аналіз особливостей цифрових систем управління прецизійними приводами. Визначені фактори, що обмежують можливості підвищення точності і швидкодії позиційних приводів. Наведено варіант побудови широтно-імпульсного модулятора для управління електродвигуном, який дозволяє розширити смугу пропускання приводу і підвищити чутливість системи при роботі в діапазоні малих швидкостей і моментів. Представлені результати розрахунків і рекомендації по застосуванню запропонованого методу.

керуюча система, цифровий привід, діапазон швидкостей, точність позиціонування, дестабілізуючі фактори, лінійний двигун, широтно-імпульсна модуляція, пульсуючий момент, датчик

Вступ

На сучасному етапі розвитку автоматизованого виробництва до статичної і динамічної точності роботи електроприводів пред'являються все зростаючі вимоги. Розширення діапазону робочих швидкостей і підвищення точності позиціонування виявилось можливим завдяки вдосконаленню механічної частини координатних приводів, зокрема застосуванню направляючих з аеростатичними опорами і безредукторних лінійних двигунів. Подібні рішення дозволили звести до мінімуму вплив таких дестабілізуючих роботу приводів факторів, як сухе тертя, наявність люфтів і нелінійностей передачі від двигуна до керованого елементу. Отримання сучасної приводної системи на більш високому якісному рівні розкрило більш широкі можливості для вдосконалення характеристик приводів, у тому числі шляхом відшукування принципово нових рішень при побудові керуючої частини приводів.

Аналіз досліджень і публікацій. Одним з природних ефективних напрямів стало використання мікропроцесорної техніки, яка дозволяє формувати необхідну структуру приводу з функціональним навантаженням окремих його частин практично не обмеженої складності і діючої в реальному масштабі

часу [1, 2]. Одночасно розкриваються такі додаткові можливості, як інтелектуалізація системи, впровадження засобів самоконтролю і діагностики, створення закінчених повністю автономних керуючих систем, формування приводів нетрадиційних структур, вирішуючих додаткові задачі (енергозбереження, довговічність компонентів, оптимізація технологічного процесу) і працюючих в умовах нестабільності зовнішніх впливаючих факторів в широкому діапазоні [2, 3].

Подібні приводи пропонуються більшістю світових виробників, цифрова техніка постійно удосконалюється і розвивається. Проте існує ряд причин, що зберігають актуальність проблеми розробки і застосування аналогової частини з новими більш високими параметрами і властивостями. По-перше, тому, що управління проводиться саме аналоговими елементами і значеннями їх аналогових параметрів, джерелом управляючих або контрольованих (регульованих) сигналів, як правило, є аналогові елементи (датчики), а з другого боку – ні практично, ні теоретично не усувні повністю такі недоліки цифрових систем, як квантування сигналу за рівнем і дискретність в часі. В більшості випадків потрібне відшукування певного компромісу між швидкодією і точністю системи з цифровою обробкою сигналів. До-

сяжна межа продовжує підвищуватися, проте якісного стрибка на цьому шляху не очікується, оскільки це вимагає істотного збільшення обчислювальних витрат (кількості операцій в одиницю часу), а певні межі, обмежені фізичними законами, вже досягнуті.

Постановка завдання

Якщо розглядати звичайний слідкуючий привід, побудований за принципом вкладених систем (контурів), можна виділити такі контури, відмінні за виконуваною функцією і необхідною швидкістю:

- контур формування струму в обмотках двигуна, що створює робочий момент, прикладений до керованого об'єкту (внутрішній контур);
- контур стабілізації або регулювання швидкості переміщення керованого об'єкту (проміжний контур);
- контур управління траєкторією руху або положенням об'єкту відповідно до заданого закону або іншого алгоритму керування (зовнішній контур).

У першому випадку потрібна найбільша швидкодія, оскільки смуга пропускання саме цього контура обмежує можливості подальших, а значить і всієї системи в цілому. Вимоги до кожного наступного контура менш жорсткі і саме тут виправдано застосування цифрової техніки, що формує складні алгоритми управління з великою кількістю обчислень, але не вимагаючи їх виконання за гранично короткий період часу. Часто в таких контурах за допомогою мікропроцесорних засобів формуються такі функціональні вузли, як пропорційно-інтегральні регулятори, елементи нелінійної корекції, системи із комутуваною структурою, прогнозуючі елементи, системи з еталонною моделлю та ін.

До першого ж контура, незалежно від того, який тип двигуна застосовується (двигун обертання або лінійний, постійного або змінного струму), пред'являється одна головна вимога – формування управляючого моменту пропорційно вхідній коман-

ді за лінійним законом в максимально широкій смузі пропускання, яка повинна залишатися постійною у всіх режимах роботи (за різних значень швидкості і формованих моментів) або, як мінімум, не знижуватися нижче заданої межі.

Вирішення завдання

З енергетичних міркувань найдоцільнішим способом управління обмотками двигуна є режим широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) напруги джерела живлення [1, 4, 5], за якого зводяться до мінімуму втрати енергії в комутаційних елементах, а силові електронні блоки вдається виконати у дуже малих габаритах. При виборі частоти ШІМ керуються кількома міркуваннями: період комутації не повинен бути більше бажаної постійної часу контуру управління струмом, тобто за необхідності розширення смуги пропускання контуру частоту ШІМ слід підвищувати; частота ШІМ не може бути не виправдано високою, оскільки з її зростанням збільшуються і комутаційні втрати в силових елементах; в певних випадках виникає необхідність усунення небажаного акустичного ефекту працюючого приводу, для чого частоту ШІМ виводять за межі сприйняття людського слуху.

Широкого поширення набули мостові схеми (для двигунів постійного і двофазних змінного струму) і трифазні схеми для двигунів змінного струму. Роботу ШІМ зручніше розглянути на прикладі двигуна постійного струму, оскільки одержані нижче результати можуть бути перенесені на випадок управління обмотками двигунів змінного струму (з двома і трьома обмотками).

Припустимо, частота ШІМ обрана і відповідає згаданим критеріям. Сучасні швидкодіючі комутаційні елементи допускають роботу з істотно малими втратами на досить високих частотах. Тому розробники все частіше зупиняються на частотах в 8-16 кГц і вище, які найбільш повно задовольняють перерахованим критеріям. Розглядаючи процеси, що

відбуваються в обмотках двигуна, слід брати до уваги такі параметри, як індуктивність L_a і активний опір R_a якорної обмотки. При підключенні джерела напруги U_p до такого споживача струм I_a в ланцюзі починає наростати з постійною часу $T_a = L_a/R_a$ відповідно до закону, описуваного диференціальним рівнянням

$$L \frac{\partial I_a}{\partial t} + I_a R_a = U_p. \quad (1)$$

Розв'язання даного рівняння дає вираз для зміни струму $I_a(t)$ в часовій області в середині кожного циклу ШІМ:

$$I_a(t) = I_0 + \left(\frac{U_p}{R_a} - I_0 \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T_a}} \right), \quad (2)$$

де I_0 – струм в початковий момент чергового циклу ШІМ; t – час, що минув від початку циклу.

Постійна часу T_a визначається конструкцією обмотки конкретного двигуна і звичайно становить одиниці або десятки долі мілісекунд, що часто може перевищувати період ШІМ T_m , який, наприклад, для обраної частоти в 10 кГц дорівнює 0,1 мс. Отже, формування струму при зміні скважності ШІМ в цьому випадку відбуватиметься протягом кількох періодів.

Відмінності в можливих варіантах побудови ШІМ містяться в другій частині циклу, коли джерело напруги від споживача відмикається. Якщо на цьому проміжку часу обмотка закорочується, струм в ній не припиняється, а повільно убуває з тією ж постійною часу T_a до початку наступного циклу. В результаті, якщо ширина імпульсів ШІМ залишається незмінною, в обмотці двигуна встановлюється середній струм на певному рівні від максимального його значення U_p/R_a пропорційно скважності імпульсів, і відбувається це з середньою постійною часу, співпадаючою з T_a .

Подібна система добре зарекомендувала себе і використовується завдяки простоті побудови і опису, який відповідає управлінню двигуном звичай-

ною безперервною регульованою напругою без застосування ШІМ, тобто в даному випадку маємо вирішення схемотехнічної задачі створення такого силового блоку, який би формував регульований момент на виході двигуна з малими пульсаціями без значних енергетичних втрат.

Проте дискретне управління ШІМ дозволяє вирішити і інші задачі, які не піддаються розв'язанню при використанні безперервного управління. Зокрема, це отримання пульсуючого моменту з частотою ШІМ, що дозволяє навіть при формуванні малих середніх моментів долати значні сили сухого тертя. Такий режим легко організовується, якщо до обмотки поперемінно підключається повна робоча напруга U_p змінної полярності.

Цей режим описується тими співвідношеннями, що і у попередньому випадку. За високої частоти ШІМ він також наближається до безперервного управління.

Шляхом зниження частоти можна за необхідності збільшити амплітуду пульсацій моменту, але при цьому зростають енергетичні втрати безпосередньо в обмотках двигуна, що слід віднести до вкрай небажаних і шкідливих для збереження працездатності двигуна явищ.

Процеси, що відбуваються в обмотці двигуна для двох розглянутих варіантів, представлені на рис. 1, 2.

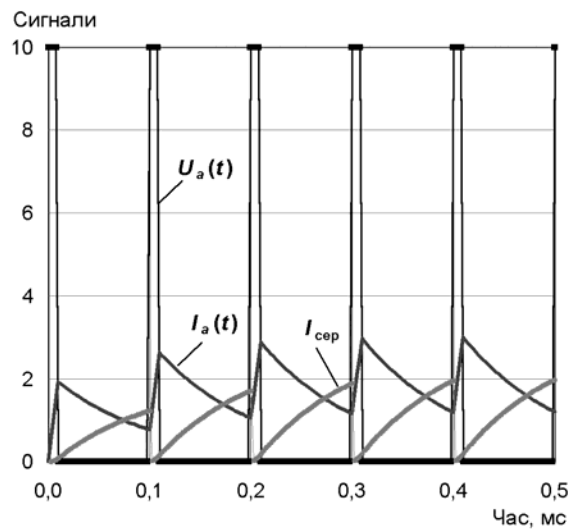


Рис. 1. Полярне ШІМ-управління

На діаграмах зображена часова залежність струму в обмотці I_a і середнього його значення $I_{\text{сеп}}$, підрахованого від початку чергового циклу, при управлінні двигуном напругою ШІМ частотою 10 кГц. Постійна часу обмотки T_a для розрахунків вибрана рівною 0,1 мс. До моменту часу $t = 0$ с всі сигнали прийняті рівними нулю.

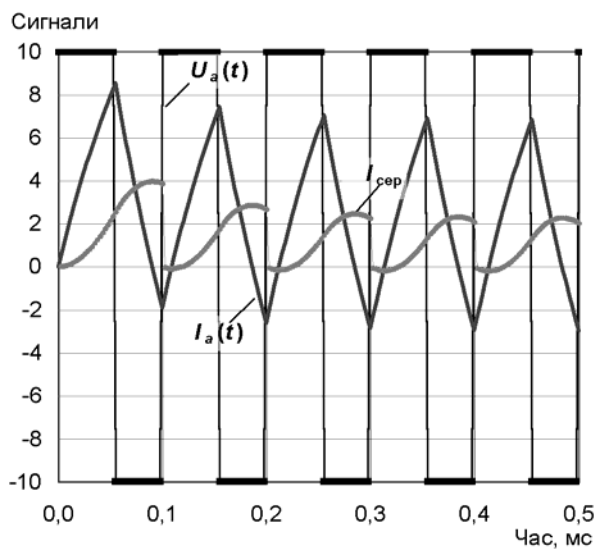


Рис. 2. Знакозмінне ШІМ-управління

Очевидно, що навіть за такої малої порівняно з періодом модуляції постійної часу T_a обмотки починаючи від моменту надходження команди стале середнє значення струму формується в обох випадках тільки після завершення кількох періодів ШІМ.

При знакозмінному управлінні (рис. 2) амплітуда пульсацій струму на порядок вища, ніж при полярному (рис. 1), коли конкретна полярність прикладеної напруги визначається поточним знаком команди на вході модулятора.

Нижче наводиться алгоритм, що дозволяє реалізувати додаткові переваги ШІМ при збереженні безпечного режиму роботи. Відмінність від першого варіанту полягає в тому, що в другій частині циклу ШІМ обмотка двигуна не закорочується, а відключається від джерела живлення. Режиму холостого ходу в початковий момент не виникає, оскільки в цей період відкриваються захисні діоди силових ключів, обмежуючи напругу зворотної полярності,

що виникає на обмотці, на рівні U_p . Струм в обмотці при цьому убиває до нуля за час, приблизно співпадаючий з тривалістю відкриття ключів t_c в першій частині циклу (рис. 3). Характерною ознакою такого режиму є наявність в циклі ШІМ ділянки з відсутнім струмом.

Розрахунки показують, що при малих управляючих сигналах середній створюваний за період струм пропорційний квадрату скважності $Q_c = t_c/T_m$ імпульсів ШІМ до значення $Q_c = 0,5$. При цьому кожний цикл починається з нульового струму в обмотці без накопичення останнього від періоду до періоду згідно з виразом (2), що відповідає одержанню максимальної смуги пропускання струмового контура, коли задане значення струму встановлюється за один період ШІМ. Для лінеаризації характеристики модулятора потрібно використання параболічного закону модуляції, за якого ширина імпульсу t_c пропорційна квадратному кореню вхідної команди, реалізація якого, в тому числі і засобами аналогової техніки, не викликає ускладнень.

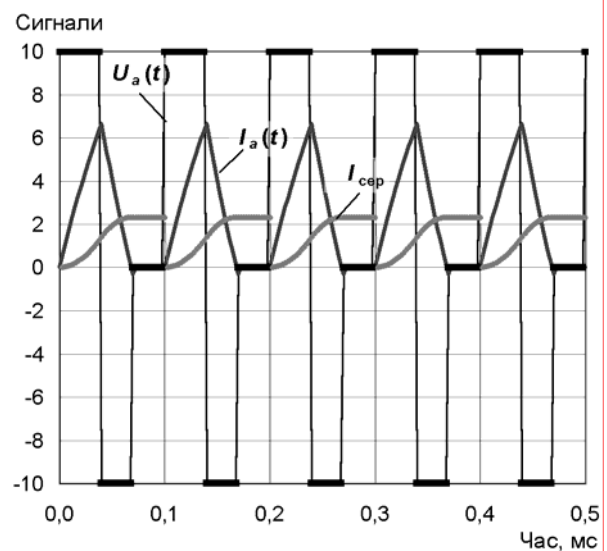


Рис. 3. ШІМ-управління з холостим ходом

Якщо перші два варіанти ШІМ для розширення смуги пропускання струмового контура (наприклад, до частоти, визначуваної періодом ШІМ) вимагають обов'язкового застосування зворотного зв'язку з відповідним датчиком (або обчислювачем) серед-

нього струму за період, то в третьому такий зв'язок при Q_c до 0,5 працює з нульовою помилкою, а починає діяти тільки при великих управляючих сигналах.

У запропонованому варіанті двигун працює в полегшеному режимі, перегріву обмоток не відбувається, і в той же час на навантаженні формується високочастотний пульсуючий момент аж до найменших середніх значень робочого моменту, що робить струмовий контур більш чутливим, а значить і більш точним привід в цілому.

Розглянутий підхід з використанням супутнього ефекту ШІМ для подолання впливу сухого тертя безпосередньо в струмовому контурі порівняно з відомими методами адаптивної корекції, що використовують ковзаючі і релейні режими [6, 7], володіє безперечними перевагами з тієї причини, що пульсуючий момент носить регулярний характер і формується на максимальній частоті приводу в самій швидкодіючій його частині, завдяки чому не спричиняє небажаних механічних і теплових перевантажень елементів пристрою.

Крім того, якщо від приводу не вимагається забезпечення найбільших моментів і достатньо одержуваних при скважності, меншій за 0,5, а також, якщо використовуються двигуни з малою постійною часу T_a в порівнянні з періодом ШІМ, від застосування датчика струму можна повністю відмовитися, а для контролю фактичної швидкості, наприклад, при використанні двигуна постійного струму, виконувати вимірювання ЕРС обертання в період знеструмлення обмотки в кінці кожного періоду. Це суттєво спрощує конструкцію електропривода, робить його максимально компактним і більш надійним, що має важливе значення в ряді автоматичних систем, зокрема в промислових роботах.

Висновки

Наведений варіант побудови широтно-імпульсного модулятора для управління електродвигуном

реалізовано на практиці і успішно застосовано для експлуатації в складі прецизійних слідкуючих приводів оптико-механічних приладів.

Розглянуті рішення дозволили розширити смугу пропускання приводу і підвищити тим самим чутливість системи при роботі в діапазоні малих значень робочих швидкостей і моментів. Одночасно дотримані умови безпечної і надійної експлуатації як механічної, так і електронної частин пристрою.

Література

1. Ломака М.В., Медведев И.В. Микропроцессорное управление приводами. – М.: Машиностроение, 1990. – 96 с.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами. – Л.: Энергоатомиздат, Лен. отд-е, 1982. – 392 с.
3. Гельднер К., Кубик С. Нелинейные системы управления: Пер. с нем. – М.: Мир, 1987. – 368 с.
4. Шишляков В.Ф. Синтез нелинейных систем управления с импульсными модуляторами // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – Т. 46, № 12. – С. 25-30.
5. Кротенко В.В. Параметрический синтез цифровых систем управления с широтно-импульсными преобразователями // Изв. вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 11. – С. 31-38.
6. Емельянов С.В., Уткин В.И. Теория систем с переменной структурой. – М.: Наука, 1970. – 592 с.
7. Автоматизированный электропривод / Под ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 448 с.

Надійшла до редакції 1.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Квасніков, Національний авіаційний університет, Київ.