УДК 681.513.5 – 62-83::621.313.2

В. І. Мороз, д-р техн. наук, доц.; І. Ф. Снітков; Б. М. Харчишин, канд. техн. наук

МІКРОКОНТРОЛЕРНЕ КЕРУВАННЯ БЕЗКОНТАКТНИМ ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЯК МЕТОД РЕАЛІЗАЦІЇ ОПТИМАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розглянуто особливості використання мікроконтролерного керування силовими драйверами статорних обмоток трифазного синхронного двигуна з постійними магнітами для реалізації оптимального використання конструкційних матеріалів.

Вступ та постановка задачі

Розвиток силової та мікроелектроніки зумовив появу нових принципів створення електричних машин. Як приклад, можна навести безконтактні двигуни постійного струму (БДПС), які з'явились завдяки здешевленню та розширенню можливостей напівпровідникової техніки та вдосконаленню конструктивних матеріалів, зокрема, появі потужних малогабаритних постійних магнітів на основі Nd-Fe-B.

Специфікою побудови БДПС є наявність безконтактного комутатора статорних обмоток синхронного двигуна з постійними магнітами (СДПМ), стан ключів якого визначається поточним положенням ротора, прикладеною до статорних обмоток напругою і механічним навантаженням на роторі. Дискретне керування напівпровідниковим комутатором (драйвером обмоток) здійснюється відповідним контролером, який, у простішому випадку, для генерації керувальної послідовності для драйвера використовує сигнал датчика положення ротора, або, в складнішому випадку, здійснює за вимірюваними параметрами (значенням наведеної ЕРС на статорних обмотках, струмом через обмотки тощо) ідентифікацію поточного положення ротора.

Метою статті є розгляд особливостей використання сучасних мікроконтролерів для реалізації оптимального за заданим критерієм керування трифазними синхронними двигунами з постійними магнітами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Класичною на сьогодні працею щодо реалізації керування СДПМ (векторне керування та пряме керування моментом — DTC — direct torque control) є робота [1]. Для систем з векторним керуванням такими двигунами пропонуються алгоритми і методи синтезу з реалізацією оптимальних за різними критеріями (максимального моменту для заданого струму, максимального ККД тощо) законів керування [2—4]. Також у літературних джерелах запропоновано заходи стосовно обмежень регульованих координат з точки зору запобігання їхнього виходу за допустимі межі [5].

Слід зазначити, що розглянуті дослідження абстрагуються від конкретної реалізації алгоритму керування безпосередньо драйверами СДПМ, вважаючи, що в системі електроприводу вже існує система векторного керування чи система DTC і для неї потрібно лише сформувати задавальні впливи. При цьому не береться до уваги, що задача ідентифікації параметрів системи і визначення поточних координат електроприводу є доволі непростою і, наразі, не розв'язаною до кінця [6].

Викладення основного матеріалу статті

Сучасна тенденція використання в складних системах керування мікропроцесорної техніки дає змогу втілити на апаратному і програмному рівнях такі складні закони регулювання, як векторне керування електричними машинами змінного струму і керування за принципом DTC. Не вдаючись у теоретичні та технічні подробиці реалізації цих принципів керування,

© В. І. Мороз, І. Ф. Снітков, Б. М. Харчишин, 2012

які достатньо ґрунтовно розглянуті у відомій літературі, зокрема, [1, 6], потрібно зазначити, що окремі питання програмної і технічної реалізації, зазвичай, не вирішуються. До них належать, наприклад, розглянуті у цій статті питання забезпечення необхідної точності підтримання кута вектора статорних напруг, що формується драйвером СДПМ, і вплив на реалізацію регуляторів обмеженої розрядності апаратної частини цифрової системи керування.

Особливістю роботи драйвера СДПМ у випадку реалізації алгоритму керування БДПС є формування 6-точкової (зі зсувом 60 ел. град.) дискретної послідовності обертового магнітного поля статора двигуна, що робить допустимим зсув моменту комутації драйвера у межах ±30° для пошуку оптимального моменту комутації з огляду на поточне навантаження [7] (див. рис. 1, де таку послідовність показано в області комплексних чисел для вектора фазної напруги драйвера).

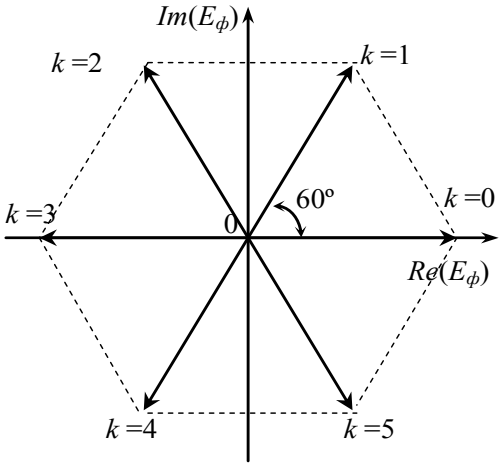

Рис. 1. Шести-точкова послідовність повороту вектора фазних напруг драйвера БДПС в області комплексних чисел

До речі, 6-точкова комутація використовується і в системах керування електричними двигунами змінного струму за принципом DTC. Як випливає з рис. 1, максимальне відхилення кута повороту ротора $\Delta\theta$ від поточної точки комутації не перевищує ±30°, що, як показують нескладні розрахунки, призводить до зменшення електромагнітного моменту не більше, ніж на 14 %. Якщо ж задатися максимальною похибкою кута комутації в межах ± 15°, то деградація електромагнітного моменту не перевищить 4 %. Таким чином виникає логічне питання: — яка точність підтримання кута вектора керування потрібна в реальній системі електроприводу? Звичайно, обґрунтована відповідь на це запитання можлива лише у випадку врахування всього набору факторів — необхідної динамічної та статичної точності, потреби забезпечення мінімального рівня пульсацій моменту, точності ідентифікації параметрів СДПМ і поточних координат тощо. Проте, відповідь проектувальника на запитання: — яка реальна похибка відхилення кута повороту ротора від заданої є допустимою? — може відчутно спростити як алгоритм керування, так і знизити вимоги до апаратної частини контролера електроприводу.

Іншим фактором, який найчастіше не враховується у процесі розробки мікроконтролерних і мікропроцесорних систем керування електричними машинами змінного струму, є обмежена розрядність апаратних засобів: більшість промислових мікроконтролерів є 8- і 16-розрядними, а популярні цифрові сигнальні процесори — 32-розрядні. Така обмежена розрядність призводить до появи таких негативних ефектів, як похибки у процесі обчислень, які принципово неможливо виявити (хіба що провести паралельно альтернативні обчислення, а потім порівняти результати — зрозуміло, що на практиці цього ніхто не робить). Ефект від обмеженої розрядності подання даних у мікропроцесорній системі показано нижче на доволі простому прикладі. Для ілюстрації цього ефекту як приклад використано цифрову модель неперервної системи третього порядку з передатною функцією

$$W(s)=\frac{1}{\left(T_1 s+1\right)\left(T_2^2 s^2+2\xi T_2 s+1\right)},$$

де $T_1 = 5$ мс, $T_2 = 2$ мс — сталі часу, що є типовими для систем з БДПС; $\xi = 0{,}6$ — коефіцієнт демпфування коливної ланки другого порядку.

Подібна неперервна система може бути складовою частиною спостерігача невимірюваних координат системи векторного керування двигуном змінного струму чи використовуватися для ідентифікації параметрів СДПМ. Після дискретизації неперервної системи за допомогою відомої підстановки Тастіна [8] з періодом 33 мкс (такий період відповідає типовій частоті роботи широтно-імпульсного перетворювача 30 кГц у сучасних електроприводах змінного струму з векторним керуванням чи за системою DTC з силовою частиною на основі потуж-

них польових транзисторів або IGBT) отримано дискретну передатну функцію з чотирма точними цифрами її коефіцієнтів:

$$\frac{z^3+3z^2+3z+1}{\left(4{,}378z^3-13{,}02z^2+12{,}90z-4{,}263\right)\cdot 10^{-6}}.$$

Для знайденої дискретної передатної функції отримано розподіл полюсів в одиничному колі на комплексній площині (рис. 2, де показано також правильне положення полюсів у випадку запису дискретної передатної функції з усіма точними цифрами коефіцієнтів).

Навіть поверхневий аналіз показаного на рис. 2 розміщення полюсів свідчить, що у випадку подачі коефіцієнтів дискретної передатної функції чотирма десятковими цифрами, отримана цифрова система буде нестійкою, що й показано для її перехідної характеристики на рис. 3 (для порівняння на графіку показана також перехідна характеристика неперервної системи). Для реальнішого у практиці випадку задавання коефіцієнтів у мікроконтролері лише трьома десятковими цифрами, ситуація виглядатиме ще гіршою.

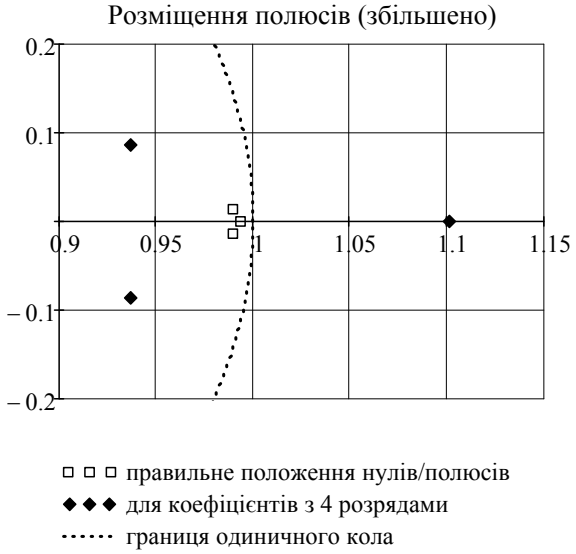

Рис. 2. Розміщення полюсів тестової дискретної передатної функції у випадках точного задавання її коефіцієнтів та для їхнього запису з чотирма точними цифрами

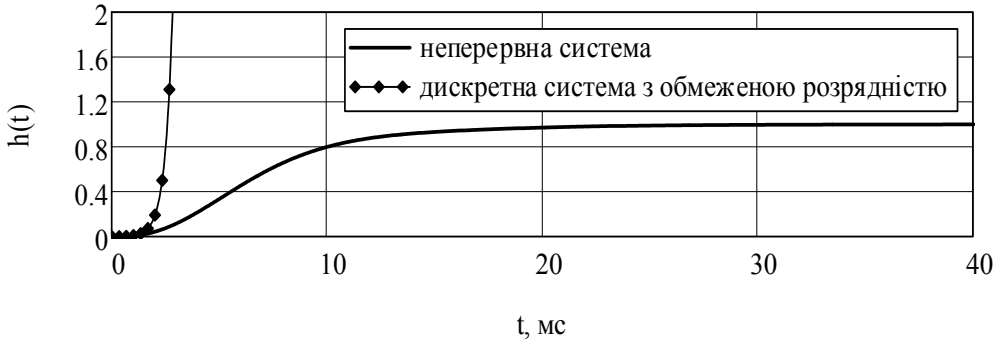

Рис. 3. Перехідні характеристики неперервної системи та її дискретного аналога із записом коефіцієнтів з чотирма точними цифрами

Потрібно зазначити, що найчастіше під час практичної реалізації цифрових регуляторів точність задавання коефіцієнтів розробниками обмежується трьома-чотирма десятковими цифрами, а увага на проблемах наслідків реалізації обчислень на системах з обмеженою розрядністю не акцентується. Одночасно обмежена розрядність апаратних засобів може бути причиною появи непрацездатних систем, а справжня причина такої появи, зазвичай, є неочевидною.

Висновки

Таким чином, пряма реалізація існуючих принципів оптимального керування, хоч і теоретично обґрунтованих, не завжди може забезпечувати їх успішне втілення. Побудова цифрових систем керування вимагає глибокого розуміння усіх процесів та їхніх наслідків у таких цифрових системах.

Використання розглянутих у статті принципів дало змогу реалізувати раціональне, з точки зору ефективного використання конструкційних матеріалів, керування моментним безконтакт-

ним двигуном ДБМ 160-2 і ДБМ-160-7 для малогабаритної квантово-механічної системи, розробленого і виготовленого на замовлення Федерального космічного агентства Росії в спеціальному конструкторському бюро (СКБ) електромеханічних систем Національного університету «Львівська політехніка».

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Перельмутер В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В. М. Перельмутер. — Харків : Основа, 2004. — 210 с.

2. Толочко О. І. Уніфікований алгоритм керування синхронними двигунами без електричного збудження / О. І. Толочко, В. В. Божко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». — 2011. — № 11(186). — С. 392—395.

3. Щур І. З. Застосування принципів пасивного керування до синхронних машин з постійними магнітами як Гамільтонової системи з керованими входами/виходами / І. З. Щур, Ю. О. Білецький // Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2011. — № 03(79). — К. : Техніка, 2011 [науково-технічний журнал]. — С. 77—79.

4. Щур І. З. Енергетична ефективність застосування стратегій керування синхронним двигуном з постійними магнітами / І. З. Щур, М. Ф. Мандзюк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2011. — № 03(79). — К. : Техніка, 2011. — С. 400—401.

5. Толочко О. І. Визначення допустимої області застосування оптимальних алгоритмів керування синхронним двигуном з постійними магнітами / О. І. Толочко, Є. О. Вареник, В. В. Божко // Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2011. — № 03(79). — К. : Техніка, 2011. — С. 72—74.

6. Holtz J. Sensorless Control of Induction Motor Drives / Joachim Holtz // Proc. of the IEEE, Vol. 90, No. 8, Aug. 2002. — P. 1359—1394.

7. Мороз В. Трифазний двигун з постійними магнітами як об'єкт керування / В. І. Мороз, І. Ф. Снітков // Електротехнічні та комп'ютерні системи. — 2011. — № 03(79). — К. : Техніка, 2011. — С. 280—281.

8. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления / Б. Куо ; пер. с англ. — М. : Машиностроение, 1986. — 448 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Стаття надійшла до редакції 14.10.11
Рекомендована до друку 25.11.11

Мороз Володимир Іванович — професор кафедри електроприводу і автоматизації промислових установок;

Снітков Ігор Філатович — завідувач лабораторії, ***Харчишин Богдан Михайлович*** — провідний науковий співробітник лабораторії НДЛ-68 Спеціального конструкторського бюро електромеханічних систем.

Національний університет «Львівська політехніка», Львів