

3. В результаті проведеного математичного моделювання доведено, що ПД-керування для реалізації поставленої задачі демонструє більш високу швидкодію, ніж нечітке керування.

4. Система керування рекуперативним гальмуванням, що розроблена у роботі, здатна значно покращити енергоефективність приводу та забезпечити безпечне гальмування в усіх режимах роботи, що є важливим результатом для функціонування подібних систем.

Список літератури

1. **Смотров Е.А.** Оптимизация процесса торможения в электроприводах малых электротранспортных средств // **Е.А. Смотров, Д.В. Вершинин, В.Г. Герасимьяк** // Электротехнические и компьютерные системы. – К.: Техника, 2012. -- №05(81). – С. 5-11.
2. **Бурков А.Т.** Сберегающие технологии тягового электроснабжения с рекуперацией энергии торможения поездов [Текст]: тез. док. / **А.Т. Бурков, В.М. Варенцов, А.Н. Марикин** и др. // II Евроазиатская конференция по транспорту. – С-Пб.: ЦНИИТ СЭТ, 2000. – С. 93.
3. **Черемисин В.Т.** Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения / **В.Т. Черемисин, В.Л. Незевак, А.С. Вильгельм, В.А. Кващук** // Локомотив. – 2013. -- №8. – С. 5-9.
4. **X. Nian** Regenerative braking system of electric vehicle driven by brushless DC motor / **X. Nian, F. Peng, H. Zhang** // IEEE Transactions on industrial electronics, vol. 61, no. 10, 2014. – pp. 5798-5808.
5. **F. Wang** A series regenerative braking control strategy based on hybrid-power / **F. Wang, X. Yin, H. Luo, Y. Huang** // International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, 2012. – pp. 65-69.
6. **Висин Н.Г.** Функциональная схема системы автоматического управления рекуперативным торможением для электровозов постоянного тока со статическими преобразователями / **Н.Г. Висин, Б.Т. Власенко, А.И. Кийко** // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2003. – Вип. 1. – С. 36-40.
7. **Смотров Е.А.** Оптимизация процесса рекуперативного торможения в электроприводах малых электротранспортных средств / **Е.А. Смотров, Д.А. Вершинин, В.Г. Герасимьяк** // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – №7. – С. 18-21.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 681.3

І.А. КОЗАКЕВИЧ, ст. викладач, Криворізький національний університет

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ СИНХРОННИМ ДВИГУНОМ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ФІЛЬТРУ КАЛМАНА

Синхронні двигуни з постійними магнітами широко використовуються у електромеханічних системах з високими вимогами щодо якості керування завдяки високому коефіцієнту потужності, високим показникам керування кутовою швидкістю і т.д. Для сервосистем з синхронними двигунами з постійними магнітами необхідні сигнали зворотного зв'язку за положенням ротора та кутовою швидкістю. Традиційні підходи до вирішення цього завдання передбачають використання оптичного інкрементального, абсолютного або комбінованого енкодера. Проте, використання енкодерів в якості датчиків швидкості має свої особливості, що пов'язані з роботою на низьких кутових швидкостях, оскільки в даному режимі існуючі методи не дають достатньої точності. Тому питання покращення властивостей сервоприводів з синхронними двигунами з постійними магнітами є актуальною й важливою науково-технічною задачею. Здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі підвищення точності керування синхронними машинами з постійними магнітами при наявності абсолютного чи інкрементального енкодера. Суть виконаних досліджень полягає в впровадженні у систему керування самоадаптивного спостерігача Калмана, що дозволяє суттєво покращити показники якості керування. Застосування адаптивного спостерігача Калмана на відміну від існуючих способів виміру кутової швидкості здатний оцінювати одночасно положення ротора та швидкість з високою точністю та без часової затримки. Керування синхронним двигуном на базі системи з адаптивним спостерігачем Калмана дозволяє суттєво підвищити показники якості керування, зменшити пульсації кутової швидкості, а також коливання струму i_d при пуску двигуна. Шляхом математичного моделювання доведено, що застосування спостерігача Калмана для таких систем дозволяє підвищити швидкодію системи.

Ключові слова: фільтр Калмана, синхронний двигун, спостерігач стану, абсолютний енкодер, кутова швидкість, положення ротора

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Синхронні двигуни з постійними магнітами широко використовуються у електромеханічних системах з високими вимогами щодо якості керування завдяки високому коефіцієнту потужності та показникам якості керування кутовою швидкістю і т.д. Для сервосистем з даними типами двигунів необхідні

сигнали зворотного зв'язку за положенням ротора та кутовою швидкістю. Традиційні підходи до вирішення цього завдання передбачають використання оптичного інкрементального енкодера, абсолютного енкодера або комбінованого. Для реалізації векторного керування системою приводу з синхронним двигуном з постійними магнітами, необхідно виконувати перетворення координат з трифазної системи до системи координат, що обертається.

Для здійснення такого перетворення необхідно використання абсолютного положення ротора, особливо при пуску двигуна. Таким чином, гарним рішенням є обладнання двигуна абсолютним енкодером, що здатний працювати з необхідною точністю та є зручним та надійним шляхом виміру поточного положення ротора. Крім того, абсолютний енкодер не тільки має очевидні переваги, що полягають в захищеності від впливу перешкод, зручності монтажу, але й здатний видавати двійковий код абсолютного положення ротора, що робить його використання придатним для високоточних електромеханічних систем.

Аналіз досліджень та публікацій. Останнім часом дослідження, що стосуються методів вимірювання швидкості та засобів підвищення її точності в основному стосуються інкрементальних енкодерів [1], а дослідження, що стосуються абсолютних енкодерів в основному сфокусовані на питаннях проектування та аспектах аналізу конструкцій [2]. У зв'язку з наявністю шуму квантування, неідеальністю виробництва оптичних датчиків та з інших причин положення ротора, що вимірюється за допомогою оптичного енкодера, має вимірювальний шум, що викликає певні помилки в обчисленні швидкості за допомогою сигналу положення ротора. Крім того, традиційні методи вимірювання кутової швидкості, що базуються на підрахунку кількості імпульсів за період часу, періоду одного імпульсу або комбінації названих підходів, створюють умови для розрахунку середньої швидкості на основі сигналу положення та призводять до підвищення часової затримки й помилки визначення кутової швидкості, що називається шумом сигналу. Шум кутової швидкості впливає в певній мірі як на статичні, так і на динамічні показники, стійкість сервосистеми з синхронним двигуном з постійними магнітами. Хоча фільтри низької частоти, як правило, використовуються для обмеження шуму кутової швидкості, проте таке рішення не здатне зменшити час затримки під час роботи системи.

Високоточний енкодер здатний підвищити точність методів вимірювання швидкості, проте його вартість є досить високою. Для усунення недоліків традиційних методів вимірювання кутової швидкості дослідниками запропонована низка методів оцінки кутової швидкості шляхом використання нелінійних спостерігачів [4], спостерігачів з використанням ковзних режимів [5]. Серед них заслуговує на увагу підхід, що описано у [6], де автори доводять, що чисельне інтегрування може забезпечити більш стійкий та точний результат, ніж чисельне диференціювання в умовах наявності шумів. Крім того, пропонується структура розширеного диференціатора для поліпшення якості оцінювання кутової швидкості в низькочастотному діапазоні. У [7] автори пропонують систему на основі нейронних мереж з використанням адаптивного спостерігача повного порядку Люенбергера для бездатчикового лінійного асинхронного двигуна, лінійна швидкість якого оцінюється нейронною структурою TLS EXIN. Представлена структура адаптивного взаємопов'язаного спостерігача для бездатчикового керування синхронною машиною, що використовується для оцінювання кутової швидкості, положення ротора та моменту навантаження. Оскільки швидкість не розраховується у кожному періоді вибірки, коли двигун працює на низькій кутовій швидкості, з метою забезпечення оновлення її значення на кожному періоді вибірки використовується спостерігач, що дозволяє виконувати ідентифікацію у кожному періоді дискретності та коригувати помилку оцінювання при оновленні положення. Також представлено спостерігачі повного порядку та пониженого порядку, що потребують точної математичної моделі двигуна для оцінювання кутової швидкості, запропоновано робастний цифровий диференціатор, що забезпечує визначення першої похідної сигналу датчика положення для оцінки кутової швидкості. Оскільки алгоритм фільтру Калмана є оптимальним методом оцінювання в плані мінімізації відхилень, то він може використовувати рекурсивний метод для безпосередньої обробки випадкових шумів та має низьку залежність від точності параметрів моделі. Отже, спостерігачі на базі фільтру Калмана широко використовуються для оцінювання кутової швидкості електромеханічних систем.

Постановка завдання. Оскільки сигнал помилки оптичного енкодера можна розглядати як білий гауссовський шум, оптимальне оцінювання кутової швидкості та моменту навантаження можна отримати за допомогою фільтру Калмана з послідовних сигналів положення, що містять

шум. Метою роботи є розробка запропонованого самоадаптивного спостерігача Калмана для підвищення точності сервоприводу на базі синхронного двигуна з постійними магнітами шляхом визначення положення ротора, кутової швидкості та моменту навантаження. Аналізуючи помилку квантування абсолютного енкодера, у системі розраховується вимірювальний шум системи на основі зміни положення ротора для відображення реального процесу. Спостерігач миттєвої швидкості та спостерігач Калмана використовуються разом для зменшення впливу шумів вимірювання на сигнал оцінки кутової швидкості при невідповідності часу дискретності періоду оновлення сигналу положення. Величини, що отримані в результаті оцінювання, в подальшому використовують в якості сигналів зворотного зв'язку за швидкістю та компенсаційного сигналу моменту навантаження при керуванні за збуренням, підвищуючи стійкість системи як при зміні керуючих сигналів, так і при зміні сигналів збурення.

Викладення матеріалу та результати. Кодований диск n -розрядного абсолютного енкодера містить n кіл, що представляють собою рівномірно розподілені канавки, які є провідними або непровідними для світла. Значення кодових каналів сформовані у відповідності з певними правилами, що дозволяє поставити у відповідність кожному кутовому положенню тільки один двійковий код, що асоціюється з ним, тому діапазон зміни кодів складає $0 - (2^n - 1)$. Тоді роздільна здатність n -розрядного енкодера складає $1/2^n$. Це свідчить про те, що довжина окружності, яка складає 2π рад розкладається в набір сигналів положення з кроком дискретності, що дорівнює $2\pi/2^n$ рад.

З аналізу форми сигналів абсолютного енкодера можна зробити висновок, що він змінюється при зміні величини положення ротора на значення, що є рівним величині помилки квантування, тобто $\Delta = 2\pi/2^n$ рад; проте, нове положення зчитується цифровим сигнальним процесором тільки тоді, коли настає наступний період дискретності, що створює помилку вимірювання між фактичним значенням положення та тим, що зчитується за допомогою цифрового сигнального процесора. Максимальна помилка вимірювання спостерігається тоді, коли зміна періоду дискретності відбувається якраз перед визначенням нового положення і вона дорівнює помилці дискретизації $\Delta = 2\pi/2^n$ рад, в той час як мінімальне значення спостерігається тоді, коли зміна періоду дискретності збігається з моментом зміни сигналу абсолютного енкодера, і її значення дорівнює нулю.

При роботі двигуна на низькій кутовій швидкості, положення ротора змінюється повільно, тому проміжок часу між двома послідовними оновленнями положення, що визначено за допомогою абсолютного енкодера $T_{\text{дискр}}$ стає більшим за час дискретності T_s , який є постійним за величиною. У цьому випадку часовий інтервал між двома послідовними оновленнями сигналу положення, визначеного за допомогою цифрового сигнального процесора T_1 є більшим за T_s . При роботі двигуна з високою кутовою швидкістю положення ротора змінюється досить швидко, $T_{\text{дискр}} < T_s$, а $T_1 = T_s$.

Сигнал швидкості обчислюється шляхом диференціювання положення ротора, що зчитується за допомогою цифрового сигнального процесора. Крім того, традиційні методи вимірювання швидкості, такі як метод Ейлера, метод змінного періоду, метод перекриття періодів розраховують швидкість з використанням прямої апроксимації диференціювання замість безпосереднього алгоритму диференціювання.

Метод Ейлера базується на алгоритмі знаходження середньої швидкості з використанням зміни положення та моменту часу, що відповідає періоду вимірювання, що є рівним до T_1 , а рівняння розрахунку має наступний вигляд

$$\omega(m) = \frac{\theta(m) - \theta(m-1)}{T_m}, \quad (1)$$

де T_m – інтервал часу між $(m-1)$ -ю та m -ю змінами положення ротора, $T_m = T_1$. Похибка визначення кутової швидкості $e_{EM}(m)$ може бути оцінена так

$$e_{EM}(m) = \frac{\Delta\theta(m) - \Delta\theta(m-1)}{T_m}. \quad (2)$$

Оскільки похибка вимірювання є випадковою величиною, яка не має жодного відношення до T_s , цей процес можна розглядати як рівномірний розподіл ймовірностей в межах від 0 до Δ , його щільність розподілу обернено пропорційна часовому вікну. З метою порівняння похибки різних методів вимірювання швидкості інтервал часу між двома послідовними оновленнями положення за допомогою цифрового сигнального процесора T_1 приймається постійною величиною. Діапазон зміни, математичне очікування та щільність розподілу $e_{EM}(m)$ можна записати

$$\begin{aligned} e_{EM}(m) &\in \left(-\frac{\Delta}{T_1}; \frac{\Delta}{T_1} \right); \\ E(e_{EM}) &= 0; \\ f(e_{EM}) &= \frac{T_1}{2\Delta}. \end{aligned} \quad (3)$$

Варіація помилки може бути визначена так

$$R_{EM} = E\left[(e_{EM} - E[e_{EM}]) \cdot (e_{EM} - E[e_{EM}])^T \right] = \frac{\Delta^2}{3T_1^2}. \quad (4)$$

Відповідно до (3) та (4), метод Ейлера використовує зміну положення та часовий інтервал у періоді вимірювання для розрахунку кутової швидкості. Отже, швидкість, що обчислюється за допомогою методу Ейлера, містить значну помилку.

Розглянемо метод зміни періоду. З метою зменшення помилки за кутовою швидкістю методу Ейлера, відхилення між першим та останнім положенням та інтервали часу за декілька періодів вимірювань використовуються для обчислення швидкості. Іншими словами, помилка швидкості зменшується за рахунок збільшення періодів вимірювання. Цей метод носить назву методу зміни періоду та може бути математично записаний так

$$\omega(m) = \frac{\sum_{h=j+1}^m \theta(h) - \theta(h-1)}{\sum_{h=j+1}^m T_h} = \frac{\theta(m) - \theta(j)}{\sum_{h=j+1}^m T_h}, \quad (5)$$

де j – та зміна положення, що зчитується цифровим сигнальним процесором, значення якого є цілим позитивним числом, що є менше за m ; значення $m - j$ обирається в залежності від кутової швидкості, тобто при низькій кутовій швидкості вибирається менше значення, а при високій кутовій швидкості – більше, а T_h – це часовий інтервал між $(m - 1)$ -ю та h -ю зміною положення ротора. Крім того, діапазон зміни $e_{3П}(m)$ та варіація помилки $R_{3П}$ методу зміни періоду можуть бути записані так

$$\begin{aligned} e_{3П}(m) &\in \left[-\frac{\Delta}{(m-j)T_1}; \frac{\Delta}{(m-j)T_1} \right]; \\ R_{3П} &= \frac{\Delta^2}{3((m-j)T_1)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Судячи з (6), можна зробити висновок, що метод зміни періоду підвищує точність визначення кутової швидкості за рахунок збільшення періоду вимірювання, проте він викликає більшу часову затримку.

Розглянемо метод накладання періодів. Для зменшення часової затримки в методі зміни періоду, кутова швидкість, розрахована за допомогою методу зміни періоду, знаходиться у поточному та декількох попередніх періодах, усереднюється як значення швидкості у поточному періоді. Цей метод називається методом накладання періодів, а математично записати його суть можна так

$$\omega(m) = \frac{1}{v} \sum_{z=0}^{v-1} \left(\frac{\theta(m-z) - \theta(j-z)}{\sum_{h=j-z+1}^{m-z} T_h} \right), \quad (7)$$

де j – додатне ціле, що є меншим за m ; v – додатне ціле, що є меншим за $m - j + 1$.

Аналогічно до попередніх методів діапазон зміни помилки $e_{\text{НП}}(m)$ та дисперсія помилки $R_{\text{НП}}$ визначаються так

$$e_{\text{НП}}(m) \in \left[-\frac{\Delta}{(m-j)T_1}; \frac{\Delta}{(m-j)T_1} \right];$$

$$R_{\text{НП}} = \frac{\Delta^2}{3\nu((m-j)T_1)^2}. \quad (8)$$

Компромiсом між точністю визначення кутової швидкості та часовою затримкою є використання методу накладання періодів при відповідному підборі параметрів. Вищевказані три методи розрахунку кутової швидкості дозволяють виконувати послідовний розрахунок за умови, що цифровий сигнальний процесор послідовно зчитує нові сигнали положення, а не в кожному періоді вибірки. Таким чином, розрахунок швидкості з використанням розглянутих методів містить певні помилки та часові затримки.

Рівняння, що описують динаміку процесів у синхронному двигуні з постійними магнітами, мають наступний вигляд

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ M_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{c}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ M_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_M}{0} \\ M_n \end{bmatrix} i_q,$$

де ω - механічна кутова швидкість, i_q - проекція вектору струму статора на вісь q ; J - момент інерції механічної частини приводу; c - коефіцієнт в'язкого тертя; K_M - коефіцієнт передачі за електромагнітним моментом; M_n - момент навантаження, що вважається постійним на інтервалі дискретності системи, тобто

$$\frac{dM_n}{dt} = 0.$$

Після дискретизації спостерігач Калмана може бути розроблений на основі наступних рівнянь

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + w(k),$$

$$y(k) = Cx(k) + r(k),$$

де k - номер періоду дискретності; $x = \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \\ M_n \end{bmatrix}$ - вектор стану системи; $u = [i_q]$ - сигнал керування системи; $y = [\theta]$ - сигнал спостерігача; w - шум процесу, що представляє собою вплив помилок параметрів системи на якість оцінювання; r - шум вимірювання, що представляє собою похибки вимірювання та інші причини, що впливають на точність ідентифікації вхідних та вихідних змінних стану системи.

При роботі з низькою кутовою швидкістю цифровий сигнальний процесор не може оновлювати значення положення ротора на кожному інтервалі дискретності, тобто $T_1 > T_s$. У тих випадках, коли цифровий сигнальний процесор не має змоги оновити значення положення ротора, значення попереднього періоду, що залишається актуальним, має велику похибку по відношенню до реального значення. Це означає, що цифровий сигнальний процесор отримує недостовірну інформацію щодо кута повороту ротора. Тому виміряне значення $\theta(k)$, що представляє собою положення ротора на k -му інтервалі дискретності, повинно бути проігнороване системою керування. Існує два способи ігнорування значення виміру $\theta(k)$ при зміні вектору стану системи. Один з цих способів передбачає наявність дуже точної моделі системи, а другий передбачає використання підвищення матриці фільтру Калмана при наявності вимірюваного сигналу.

У традиційній системі векторного керування використовуються зворотні зв'язки за швидкістю та струмом, що обробляються ПІ-регуляторами, регулятор швидкості не може створювати умови для точного відпрацювання сигналу завдання за умови впливу моменту навантаження під час його різкої зміни. Для успішного вирішення поставленого завдання необхідно побудувати систему за збуренням та відхиленням, розглядаючи момент навантаження, що оцінюється фільтром Калмана, як сигнал збурення.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Здійснено теоретичне узагальнення й розв'язання актуальної науково-технічної задачі підвищення точності керування синхронними машинами з постійними магнітами при наявності абсолютного чи інкрементального енкодера. Суть виконаних досліджень полягає в впровадженні у систему керування самоадаптивного спостерігача Калмана, що дозволяє суттєво покращити показники якості керування. Найбільш суттєві наукові і прикладні результати, висновки і рекомендації полягають у наступному: 1. Застосування адаптивного спостерігача Калмана на відміну від існуючих способів виміру кутової швидкості здатний оцінювати одночасно положення ротора та швидкість з високою точністю та без часової затримки. 2. Керування синхронним двигуном на базі системи з адаптивним спостерігачем Калмана дозволяє суттєво підвищити показники якості керування, зменшити пульсації кутової швидкості, а також коливання струму i_d при пуску двигуна. 3. Шляхом математичного моделювання доведено, що застосування спостерігача Калмана для таких систем дозволяє підвищити швидкодію системи. 4. Реалізація у системі принципів керування за збуренням з використанням адаптивного спостерігача Калмана для оцінки моменту навантаження дозволяє надати системі можливостей своєчасного реагування на його зміну. Точність відпрацювання заданого сигналу кутової швидкості суттєво підвищується за рахунок оцінки поточного значення навантаження у системі. 5. Реалізація запропонованої системи можлива як при застосуванні абсолютного, так і інкрементального енкодера, оскільки алгоритм визначення положення ротора та кутової швидкості є ідентичним.

Список літератури

1. **S.-K. Sul** Control of Electric Machine Drive Systems, Wiley-IEEE Press, 2010.
2. **Zhou H., Wen X., Zhao F., Zhang J., Meng J.** An improved flux-weakening strategy for field-oriented-controlled PMSM drives // IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012.
3. **Кобрин А.В.** Оценка задержки с помощью робастного фильтра Калмана / А.В. Кобрин, Б.С. Тур // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Техніка та електрофізика. – 2013. – № 27. – С. 76-82.
4. **Братусь О.В.** Побудова багатовимірної моделі на основі фільтра Калмана й аналіз алгоритмів оцінювання її параметрів / **О.В. Братусь, В.М. Подладчиков** // Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». – 2013. – № 5. – С. 28-34.
5. **Кіку А.Г.** Покращення калмановської фільтрації змінних стану / **А.Г. Кіку, В.М. Аглоткова, О.С. Бурлаков** // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2003. – № 6. – С. 38-43.
6. **Лимонов А.С.** Экстраполяция дискретных сигналов с использованием фильтров Калмана / **А.С. Лимонов, Т.М. Пустовит, А.А. Лимонов** // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 9. – С. 26-37.
7. **Зарицкая Е.И.** Оптимизационный расчет тихоходного синхронного генератора на постоянных магнитах для безредукторных электрогенерирующих установок / **Е.И. Зарицкая, Л.Н. Канов, А.М. Олейников** // Проблемы техники. – 2013. – № 2. – С. 103-118.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 621.3

А.Б. СЬОМОЧКІН, канд.техн.наук, доц., В.В. ШЕВЧУК, студент
Криворізький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ В ГІБРИДНИХ СИСТЕМАХ

Суперконденсатор здатний функціонувати як пристрій для зберігання електричної енергії, викликає зростаючий інтерес серед фахівців. В даний час в багатьох роботах відзначаються позитивні якості суперконденсаторів (СК), які можуть ефективно застосовуватися для згладжування пікових струмів, що виникають в системах енергоживлення. Істотна увага приділяється застосуванню СК в системах з електромічними джерелами живлення (зокрема з АКБ), що використовуються в якості основних у автономних транспортних засобах. Іоністори являють собою висо-