

Список літератури

1. **Зинченко Е.Е.** Сравнение характеристик вентильного реактивного двигателя при его питании от коммутаторов по схемам Миллера и асимметричного моста / **Е.Е. Зинченко, В.Б. Финкельштейн** // *Електротехніка і електро-механіка*. – 2012. – № 1. – С. 33-35.
2. **Нестеренко В.И.** Экспериментальное определение динамических параметров тягового привода транспортного средства // *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. – 2005. – Вип. 8. – С. 86-87.
3. **Дембіцький В.М.** Дослідження приводу гальмівної системи транспортного засобу з гібридною силовою установкою та рекуперацією енергії / **В.М. Дембіцький** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – 2013. – № 29. – С. 28-33.
4. **Сітовський О.П.** Обґрунтування та вибір критеріїв оцінки процесу електродинамічного гальмування під час руху гібридного транспортного засобу на затяжних спусках / **О.П. Сітовський, В.М. Дембіцький** // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – 2013. – № 30. – С. 10-15.
5. **Тімков О.М.** Поява гібридних силових установок на транспортних засобах / **О.М. Тімков, О.В. Григорашенко** // *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. – 2014. – № 1. – С. 42-47.
6. **Сітовський О.П.** Електродинамічне гальмування гібридного транспортного засобу на дорогах з низьким коефіцієнтом зчеплення / **О.П. Сітовський, В. М. Дембіцький** // *Автомобільний транспорт*. – 2013. – Вип. 33. – С. 13-18.
7. **Zeraouia M., Benbouzid M., Diallo D.** Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study // *IEEE Transaction on vehicle technologies*. – Vol. 55, no. 6. – pp. 1756-1764.

Рукопис подано до редакції 18.04.16

УДК 681.3

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

СИСТЕМА РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМ ДВИГУНОМ ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ

Вдосконалення електромеханічних систем транспортних засобів в даний момент направлено на підвищення рівня їх енергоефективності. Синтез раціональних способів реалізації рекуперативного гальмування є одним з актуальних шляхів збільшення автономності електромобілів через те, що дозволяє суттєво зменшити рівень споживаної електроенергії за цикл руху. Безщіткова машина, в основі якої є синхронний двигун, відноситься до найбільш популярних типів двигунів, що використовуються в електроприводах транспортних засобів. Векторний простір системи керування ділиться на шість секторів, кожен з яких відповідає одному з шести станів сигналу датчика Холла. У той же час, безщіткова машина постійного струму при роботі на низькій кутовій частоті не створює достатню величину протиЕРС обмоток для заряду акумулятора, тобто в такому режимі відсутні умови для відновлення його заряду. Через наявність індуктивності обмоток в двигуні існують можливості для створення підвищуючого ланцюга. Для відновлення заряду акумулятора в такому режимі необхідно підняти напругу ланки постійного струму за допомогою індуктивності акумулятора. З цією метою необхідно закрити всі силові ключі, які підключені до позитивної шини ланки постійного струму, а управління ключами, підключеними до негативної шини, здійснювати за допомогою широтно - імпульсної модуляції. У роботі виконано вирішення наукової задачі, що пов'язана з розробкою системи керування рекуперативним гальмуванням електричного транспортного засобу на базі безщіткової машини постійного струму. Розроблена система керування містить блоки розділення гальмівного моменту, що виходить з позицій безпеки руху, енергоефективності та балансування координат електромобіля. За рахунок застосування нечіткого керування та ПД-регулятора система виконує розділення зусилля механічного гальмування та електричного рекуперативного. Використання ПД-регулятора є досить поширеним методом у теорії автоматичного керування, проте воно не враховує такі параметри, як заряд батареї, швидкість, інтенсивність гальмування і т.д. У розробленій системі використовується нечітке керування з трьома входними параметрами: швидкість, заряд батареї та інтенсивність гальмування.

Ключові слова: рекуперативне гальмування, безщіткова машина, система керування, генераторний режим, коефіцієнт модуляції, синхронний двигун, пошук екстремуму

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Розвиток електромеханічних систем транспортних засобів багато в чому направлений на підвищення рівня їх енергоефективності. Пошук раціональних способів реалізації рекуперативного гальмування є одним з актуальних шляхів збільшення автономності електромобілів, оскільки дозволяє суттєво зменшити частку споживаної електроенергії протягом циклу руху. Одним з найбільш популярних типів двигунів, що використовується в електроприводах транспортних засобів, є безщіткова машина постійного струму на базі синхронної машини з постійними магнітами. Отже, розробка

заходів ефективної реалізації рекуперативного гальмування вентиляним двигуном є актуальною задачею сьогодення.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка методів реалізації рекуперативного гальмування безщіткової машини постійного струму в широкому діапазоні швидкостей та навантажень.

Викладення матеріалу та результати. В останні роки електричні транспортні засоби отримали гідне визнання в якості альтернативи системам з традиційним двигуном внутрішнього згоряння. Це пояснюється екологічними та економічними причинами, а в умовах серйозного прогресу технологій, пов'язаних з виготовленням акумуляторних батарей, електричний транспорт, що перевершує по багатьом істотним характеристикам паливний, готується до прориву в області пересувних засобів. Рекуперативне гальмування, що використовується в електричному транспорті як спосіб повернення кінетичної енергії при уповільненні, неможливий для реалізації засобами системи з двигуном внутрішнього згоряння. Суть рекуперативного гальмування полягає в передачі енергії, запасеної в інерційній масі автомобіля, назад в батарею за рахунок переведення двигуна в генераторний режим. У даному режимі двигун є джерелом енергії, а батарея - навантаженням, тим самим створюється гальмівний момент електромобіля.

Проведені раніше дослідження доводять, що використання рекуперативного гальмування дозволяє збільшити шлях, що долається автомобілем від одного заряду акумулятора, до 15 %. Тим не менш, даний тип гальмування не може бути використаний в деяких режимах, наприклад, коли батарея повністю заряджена. У цьому випадку воно може здійснюватися розсіюванням енергії на резисторах. Отже, необхідність установки механічного гальма зберігається в приводах електротранспорту. Його наявність також важлива з міркувань безпеки.

Як правило, керування рекуперативним і механічним гальмуванням здійснюється однією педаллю: перша частина шляху педалі керує рекуперативним гальмуванням, а друга частина – механічним. Це дозволяє реалізувати плавний перехід від рекуперативного гальмування до механічного, що не може бути досягнуто при використанні двигуна внутрішнього згоряння.

Безщіткова машина постійного струму, що отримала в літературі назву вентиляного двигуна, ідеально підходить для електромобілів, завдяки високій щільності потужності, задовільним механічним характеристикам, високому ККД, широкому діапазону зміни кутової швидкості, низьким експлуатаційним витратам.

Основою безщіткової машини постійного струму є синхронний двигун, що означає рівність частоти обертання ротора і частоти обертання поля, створюваного статором і ротором. У той же час, вентиляний двигун відносно складний в плані керування. Як правило, на роторі такої машини розташовуються постійні магніти, а якірні обмотки - на статорі, який містить пакований сталевий сердечник. Обертання створюється і підтримується за рахунок підключення до джерела енергії протилежних полюсів обмотки, званих фазами. Інформація про поточний стан ротора необхідна для правильної комутації обмоток машини і може бути отримана за допомогою датчиків Холла або вимірюванням ЕРС обмоток. Керування безщітковою машиною постійного струму здійснюється за допомогою комутатора, в ролі якого виступає інвертор, а перемикання обмоток виконується шляхом чергування порядку включення його плечей.

Для ефективного керування вентиляним двигуном необхідно знати інформацію відносно положення ротора, виходячи з якої визначається послідовність комутації обмоток. Векторний простір системи керування ділиться на шість секторів, кожен з яких відповідає одному з шести станів сигналу датчика Холла. Виходячи з силової схеми приводу, кожна з фаз двигуна може бути підключена до високого або низького потенціалу ланки постійного струму. В той же час в кожній фазі машини генерується протиЕРС.

Рекуперативне гальмування може бути здійснено шляхом реверсування струму в ланцюзі двигун - батарея під час уповільнення, коли двигун переходить в генераторний режим. За рахунок зміни напрямку струму відбувається заряд акумулятора, а робота системи керування залишається такою ж.

У той же час, безщіткова машина постійного струму при роботі на низькій кутовій частоті не створює достатню величину протиЕРС обмоток для заряду акумулятора, тобто в такому режимі відсутні умови для відновлення його заряду. Через наявність індуктивності обмоток в двигуні існують можливості для створення підвищуючого ланцюга. Для відновлення заряду акумулятора в такому режимі необхідно підняти напругу ланки постійного струму за допомо-

гою індуктивності схеми. З цією метою необхідно закрити всі силові ключі, які підключені до позитивної шини ланки постійного струму, а управління ключами, підключеними до негативної шини, здійснювати за допомогою широтно - імпульсної модуляції. На рис. 1 представлено фазові залежності протиЕРС, якінного струму безщіткової машини постійного струму, а також сигналів перемикавання двонаправленого перетворювача енергії, в якому здійснюється керування тільки одним силовим ключем на кожному періоді комутації. Шляхом керування силовим ключем увесь перетворювач грає роль підвищуючого ланцюга.

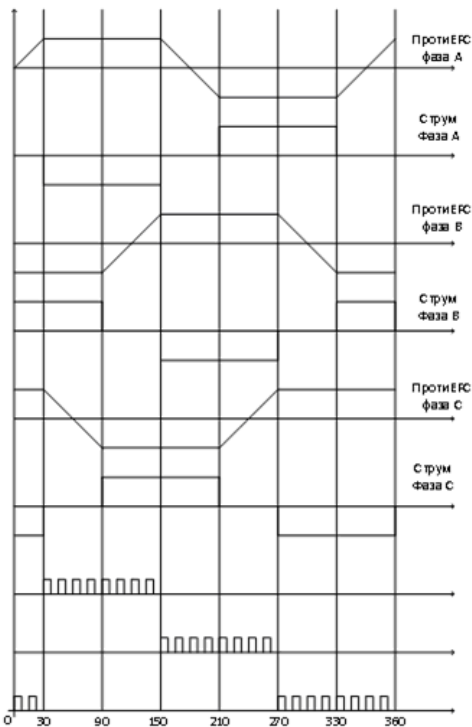


Рис. 1. Криві струмів та протиЕРС при рекуперативному гальмуванні застосуванням керування одним ключем

рішній опір якоря

$$k(m') = \frac{U_{nocm}}{U_{epc}} = \frac{2}{m' + \frac{2R}{R_b m'}} \quad (4)$$

Для знаходження максимального значення зарядної напруги в залежності від величини відносної тривалості включення необхідно продиференціювати (4) по m'

$$\frac{dk}{dm'} = \frac{2 \left(\frac{2R}{R_b} - m'^2 \right)}{\left(m'^2 + \frac{2R}{R_b} \right)^2} \quad (5)$$

Прирівнюючи похідну до нуля, знайдемо значення відносної тривалості включення m' при якому спостерігається максимальне значення зарядної напруги:

$$k_{max}(m') = k_{max} \left(\sqrt{\frac{2R}{R_b}} \right) = \frac{1}{\sqrt{\frac{2R}{R_b}}} = \frac{\sqrt{R_b}}{\sqrt{2R}} \quad (6)$$

із

Виходячи з принципу вольточасового балансу, можна зробити висновок, що чиста зміна величини напруги на індуктивності дорівнює нулю на одному електричному періоді, тобто

$$\int_t^{t+T_k} v_l dt = m T_k (2U_{epc} - 2Ri_a) + m' T_k (2U_{epc} - 2Ri_a - U_{nocm}) = 0 \quad (1)$$

$$i_a = \frac{2U_{epc}}{m^2 R_b + 2R} \quad (2)$$

де T_k - період комутації, U_{epc} - протиЕРС, i_a - струм якоря.

Виходячи з умов балансу заряду ємності ланки постійного струму, можна записати

$$\int_t^{t+T_k} i_{nocm} dt = m T_k \left(-\frac{U_{nocm}}{R_b} \right) + m' T_k \left(i_a - \frac{U_{nocm}}{R_b} \right) = 0,$$

де m - відносна тривалість включення активного стану ключів, $m + m' = 1$. Підставляючи (2) в (3), отримуємо залежність зарядної напруги U_{nocm} через відносну тривалість включення m , еквівалентний опір навантаження R_b і внутрішній опір якоря

Співвідношення $\frac{2R}{R_b}$ може змінюватися від 0 до 1. Слід зауважити, що максимальний кое-

фіцієнт передачі менше 1 для випадку, коли $\frac{2R}{R_b} > 0.5$. Іншими словами, в такій ситуації вихід-

на напруга генератора, що перетворилася в інверторі, буде менше величини ЕРС джерела, тобто енергія динамічного гальмування електромобіля буде перетворена в гальмівний момент і теплову енергію замість повернення в батарею.

Для дослідження режимів роботи електромобіля була складена математична модель в середовищі Matlab/Simulink. Управління здійснюється впливом на сигнал завдання електромагнітного моменту, який передається через компоненти трансмісії системи та здійснює рух транспортного засобу. Моделі окремих компонентів системного рівня були складені за допомогою емпіричних даних, які засновані на технічній документації, що надається виробниками компонентів або розрахунками, заснованих на основі паспортних даних, отриманих з літературних джерел.

Досліджено роботу системи рекуперативного гальмування вентильним двигуном. Блок датчика системи керування здійснює формування необхідного крутного моменту або заданого значення гальмівного моменту шляхом впливу на педаль прискорення або педаль гальма відповідно. Якщо водій бажає прискорити рух транспортного засобу, він впливає на педаль прискорення, а в залежності від рівня впливу на цю педаль формується відповідний сигнал крутного моменту. Рекуперативне гальмування починається тільки при натисканні на педаль гальма, а інтенсивність гальмування залежить від ступеня натискання педалі, яка пропорційна величині створюваного гальмівного моменту. Після того, як сигнал завдання гальмівного моменту сформований він відповідно до налаштування алгоритму гальмування поділяється на рекуперативне гальмування і механічне. Сумарна механічна енергія, споживана транспортним засобом під час руху, складається з трьох складових: аеродинамічних втрат на тертя, втрат на тертя кочення, а також енергії, що розсіюється на гальмах. Рівняння, що описує динаміку транспортного засобу, може бути записано так

$$m \frac{dv(t)}{dt} = F_{\text{мяз}}(t) - F_{\text{аер}}(t) + F_{\text{кач}}(t) - F_{\text{зр}}(t), \quad (7)$$

де m – маса транспортного засобу, v – швидкість транспортного засобу, $F_{\text{аер}}$ – аеродинамічний опір, $F_{\text{кач}}$ – опір тертя кочення, а $F_{\text{зр}}$ – сила тяжіння, яка створює опір руху при горизонтальних ділянках дороги.

Тягове зусилля $F_{\text{мяз}}$ створюється приводом автомобіля і враховує енергію, затрачену на прискорення обертових частин внутрішніх елементів, а також втрати енергії на трансмісії.

Аеродинамічні втрати на тертя. Як правило, дані втрати $F_{\text{аер}}$ апроксимуються шляхом спрощення корпусу автомобіля у вигляді призматичного корпусу з площею передньої поверхні A_f . Сила, створювана тиском гальмування, множиться на коефіцієнт аеродинамічного опору C_d для моделювання реальних умов повітряного потоку.

$$F_{\text{аер}}(v) = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_d v^2, \quad (8)$$

де v – швидкість руху автомобіля; ρ_a – щільність навколишнього повітря.

За допомогою датчика натискання педалі система отримує від водія про необхідне гальмівне зусилля. У відповідності до системи керування на базі нечіткої логіки ми отримуємо величину зусилля рекуперативного гальмування. Гальмівне зусилля рекуперативного гальмування перераховується в гальмівний струм за допомогою залежності

$$I_{\text{гал}} = k_1 F_{\text{рек}}, \quad (9)$$

тобто гальмівний струм $I_{\text{гал}}$ пропорційний зусиллю рекуперативного гальмування $F_{\text{рек}}$, а k_1 є коефіцієнтом пропорційності.

Розглянемо роботу блоку розподілу гальмівного зусилля. У системах рекуперативного гальмування електричного транспорту основне гальмівне зусилля розділяється між колісним гальмівним зусиллям F_{nep} і гальмівним зусиллям задніх коліс $F_{зад}$. Для передньої осі електромобіля гальмівне зусилля передньої осі розділяється на дві складові: гальмівне зусилля механічного гальма і гальмівні зусилля рекуперативного гальмування.

Отже, сумарне гальмівне зусилля $\sum F$ розподіляється між передніми і задніми колесами, враховуючи наявність механічного гальма задніх коліс, розподіл зусилля рекуперативного гальмування і з урахуванням координації. Розподіл гальмівного зусилля між передніми і задніми колесами електромобіля в ідеальному випадку виконується так

$$F_{зад} = \frac{1}{2} \left(\frac{mg}{h} \sqrt{b^2 + \frac{4hL}{mg} F_{nep}} - \left(\frac{mgb}{h} + 2F_{nep} \right) \right), \quad (10)$$

де g - відстань від центру ваги до задньої вісі по центральній дистанції, h - висота центру ваги електромобіля, L - відстань між передньою та задньою віссю автомобіля, m - маса електричного транспорту.

Стратегія розподілу гальмівного зусилля передніх та задніх коліс електромобіля виглядає наступним чином: при $z < 0.1$, сумарне гальмівне зусилля прикладається до приводного колеса, а переднє колесо не бере участі у гальмуванні транспортного засобу. При $0.1 < z < 0.7$ гальмівне зусилля створюється електромеханічним гальмом. У відповідності з (10), можна визначити моменти, коли передні та задні колеса електромобіля заблоковані

Розглянемо роботу підсистеми нечіткого гальмування. Розподіл гальмівних зусиль в автомобілі поряд з рекуперативним гальмуванням залежить від багатьох факторів, значна частина параметрів постійно змінюється, тому розробити чітку модель розподілу досить важко. Застосування системи нечіткого керування розподілом гальмівного зусилля електромобіля може врахувати вплив усіх цих факторів. Отже, для розподілу гальмівного зусилля використовується теорія нечіткого керування.

Система нечіткого керування розподілом гальмівного зусилля представлена на рис. 8, в ній використовується три води: гальмівне зусилля передніх коліс електромобіля, швидкість та заряд батареї. У системі нечіткого керування вхідні змінні включають гальмівне зусилля передніх коліс, заряд батареї та швидкість електромобіля. Вихідними змінними є співвідношення, що пропорційне зусиллю рекуперативного гальмування, враховуючи зусилля гальмування передніх коліс. Гальмівна сила передніх коліс повинна враховувати вимоги, що висуваються до безпечного водіння. Величина гальмівної сили визначає гальмівний шлях та час, що вимагається водієм. У системі вважається, що зміна швидкості може бути низькою, середньою і високою.

Висновки та напрямки подальших досліджень. У роботі виконано вирішення наукової задачі, що пов'язана з розробкою системи керування рекуперативним гальмуванням електричного транспортного засобу на базі безщіткової машини постійного струму. Розроблена система керування містить блоки розділення гальмівного моменту, що виходить з позицій безпеки руху, енергоефективності та балансування координат електромобіля. За рахунок застосування нечіткого керування та ПД-регулятора система виконує розділення зусилля механічного гальмування та електричного рекуперативного. Керування за допомогою ПД-регулятора є досить поширеним методом у теорії автоматичного керування, проте воно не здатне створити необхідні умови по урахуванню таких параметрів, як заряд батареї, швидкість, інтенсивність гальмування і т.д. У розробленій системі використовується нечітке керування з трьома вхідними параметрами: швидкість, заряд батареї та інтенсивність гальмування.

В результаті проведеного дослідження були встановлені наступні суттєві висновки:

1. Розроблена система керування, що базується на нечіткому керуванні розділенням гальмівного зусилля, здатна розраховувати необхідне значення гальмівного струму для створення необхідного моменту.

2. Розроблена система з ПД-регулятором широтно-імпульсної модуляції інвертора безщіткової машини постійного струму для отримання величини гальмівного моменту, відповідній заданій.

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