

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМИ РЕАКТИВНИМИ ДВИГУНАМИ

Мета. Метою даної роботи є розробка теоретичних аспектів створення бездатчикової системи ідентифікації кутової частоти обертання та положення ротора вентильного реактивного двигуна тягової електромеханічної системи шляхом використання похідних струмів, що протікають в обмотках.

Методи дослідження. У роботі використані методи теорії автоматичного керування, методи теорії оптимального керування й методи дослідження нелінійних систем автоматичного керування, варіаційне й матричне обчислення, чисельні методи та методи дискретно-польового моделювання.

Наукова новизна. Бездатчикове оцінювання кутової швидкості та положення ротора ВРД на основі виміру індуктивності обмоток при збудженні їх короткочасними імпульсами напруги при тому, що індуктивність розглядають як функцію струму та кута повороту ротора, та за відомих значень її максимальної та мінімальної величини дає можливість оцінювати механічні змінні стану електропривода без встановлення датчику на валу двигуна, що є суттєвим в контексті підвищення надійності тягових електромеханічних систем. В свою чергу, існуючі методи передбачають необхідність завчасного визначення електричних параметрів обмоток двигуна та кривої намагнічення сталі машини в залежності від струму та кута повороту ротора, що вносить суттєві складнощі в налаштування системи.

Практична значимість. Практична цінність отриманих результатів полягає у розробці алгоритмів керування вентильним реактивним двигуном без необхідності встановлення датчика положення ротора на валу двигуна, що суттєво спрощує структуру електромеханічної системи.

Результати. Визначення кутової швидкості та положення ротора ВРД на основі виміру індуктивності обмоток при збудженні їх короткочасними імпульсами напруги є можливим при аналізі індуктивності як функції струму та кута повороту ротора, та за відомих значень її максимальної та мінімальної величини дає можливість оцінювати механічні змінні стану електропривода без встановлення датчику на валу двигуна, що є суттєвим в контексті підвищення надійності тягових електромеханічних систем.

Ключові слова: вентильний реактивний двигун, бездатчикове керування, збудження обмоток, струмове керування.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Вентильні реактивні типи електричних двигунів (ВРД) в теперішній час знаходять своє гідне втілення в практику створення різноманітних електромеханічних систем і комплексів [1-4]. При цьому, технологічність, масогабаритні показники, проста конструкція, низька собівартість при серійному виготовленні, відсутність обмоток чи постійних магнітів на роторі, висока надійність, ремонтпридатність та високий коефіцієнт корисної дії при регулюванні кутової швидкості у великому діапазоні дозволяють зробити висновок про те, що перспективним напрямком широкого використання ВРД є тягові електромеханічні комплекси широкому спектру електрифікованих видів транспортних засобів. Можливості масового впровадження даного типу двигунів є і в палітрі видів гірничо-металургійних транспортних засобів.

Аналіз досліджень і публікацій. В підприємствах гірничо-металургійної галузі з підземними способами видобутку корисних копалин експлуатується більше ніж 3 тис. одиниць 20-ти типів електровозів. Усі тягові електромеханічні комплекси рудникових видів електровозів обладнані двигунами постійного струму послідовного збудження. Вищезазначені системи при цьому є неефективними з точки зору енерговитрат та потребують заміни на більш сучасні типи. Між тим, слід пам'ятати, що дані комплекси в підземних умовах рудників і шахт працюють в важких умовах та складнопідпорядкованих режимах експлуатації, що ставить на вищий щабель критерій простоти конструкції та відсутності додаткових контактних пристроїв, у т.ч. датчиків, необхідних для функціонування системи. Між тим, одним з найбільш суттєвих недоліків використання даного типу двигунів у тягових електромеханічних системах є необхідність вимірювання положення ротора [3-4] для здійснення струмового керування, що призводить до необхідності додаткового встановлення датчика на валу двигуна. Між тим, як відомо [5-7], за останнє десятиліття набули популярності бездатчикові методи керування, що дозволяють виконувати ідентифікацію положення ротора по вимірюваним електричним сигналам, що дозволяє виключити механічний датчик зі складу структури електромеханічної системи. В свою чергу, існуючі методи передбачають необхідність завчасного визначення електричних параметрів обмоток двигуна та кривої намагнічення сталі машини в залежності від струму

та кута повороту ротора, що вносить суттєві складнощі в налаштування системи, а також призводить до можливого зниження точності при зміні параметрів об'єкту керування.

Постановка завдання. Розробка теоретичних аспектів створення бездатчикової системи ідентифікації кутової частоти обертання та положення ротора вентильного реактивного двигуна тягової електромеханічної системи шляхом використання похідних струмів, що протікають в обмотках.

Викладення матеріалу та результати. Основна ідея досліджуваного у даній роботі методу керування полягає у ідентифікації вирівняного положення ротора для даної обмотки шляхом дослідження похідної струму, що протікає в ній. Розглянемо основні принципи струмового керування ВРД. При роботі на кутовій швидкості, що є меншою за номінальну, процеси можна розділити на наступні кроки (рис. 1): початкове намагнічування при максимальній величині додатної напруги; створення крутного моменту при постійній величині струму; розмагнічення двигуна шляхом включення негативної напруги.

На рис. 1 у верхній частині представлено лінійну апроксимацію зміни індуктивності обмотки машини. При цьому приймається допущення щодо постійності величини даної індуктивності L_{\min} при відхиленні від невирівняного положення ротора не більше ніж на $t_2/2$, а також постійності величини максимальної індуктивності обмотки L_{\max} при відхиленні від вирівняного положення не більше ніж на $t_1/2$. Між цими двома станами індуктивність змінюється за лінійним законом з постійним нахилом, тобто $dL/d\theta = \text{const}$.

З рисунку видно, що крутний момент може бути створений лише за умови подачі струму в момент зміни індуктивності. Тому при роботі на кутовій швидкості, що є нижчою за базову, однією з задач струмового керування є максимальне використання активної фази з точки зору збудження відповідної обмотки безпосередньо перед зростанням індуктивності. Дане початкове намагнічення виконується з малою сталою часу, оскільки індуктивність є низькою, тому, приклавши до обмотки повну напругу ланки постійного струму, можна досягти швидкого зростання струму. Як тільки обмотка буде збуджена струмом і індуктивність почне зростати, будуть існувати умови для створення крутного моменту. В цей період вихідна напруга перетворювача регулюється для забезпечення постійної величини струму, а потокозчеплення обмотки лінійно зростає.

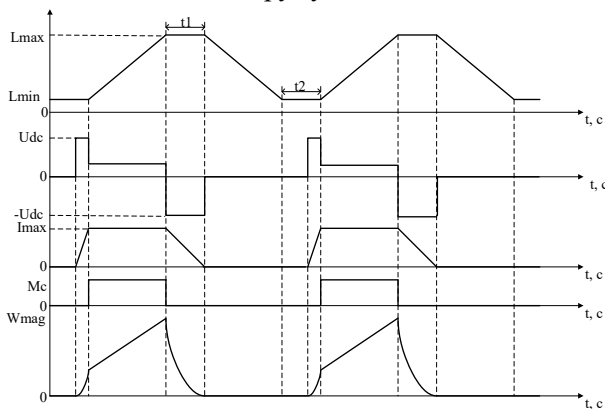


Рис. 1. Типова діаграма струмового керування вентильного реактивного двигуна

Коли період зростання індуктивності закінчується, система керування переключається у режим розмагнічування котушки шляхом підключення її до негативної напруги ланки постійного струму. Оскільки в цей час індуктивність є більшою, ніж у невирівняному положенні, то процес розмагнічування займає більше часу, ніж процес намагнічування. Завдяки цим процесам отримується імпульс крутного

моменту, причому крутний момент є нульовим при постійності індуктивності обмотки навіть при наявності її часткового збудження, що є свідченням того, що механічна потужність на валу двигуна в даний момент дорівнює нулю, а вся потужність, що споживається приводом, витрачається на намагнічення. Отже, крутний момент в загальному випадку можна зображати, як прямокутний імпульс.

Оскільки струм у обмотку подається до початку зростання індуктивності, то дане явище можна використовувати для бездатчикової оцінки положення ротора. На рис. 2 представлена форма струму в обмотці ВРД при струмовому керуванні за допомогою широтно-імпульсної модуляції. З нього видно, що в момент початку зростання індуктивності обмотки виникає від'ємна похідна струму в обмотці, що дає змогу сформувати сигнал положення ротора. В подальшому сигнали кожної фази, отримані описаним способом, поступають до підсистеми непрямої ідентифікації положення, де здійснюється усереднення частоти слідування імпульсів, розрахунок середньої частоти обертання ротора, а шляхом інтегрування отримують оцінку кута повороту ротора.

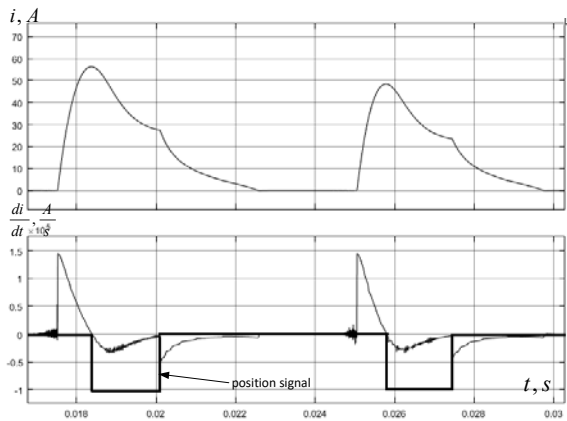


Рис. 2. Принцип формування сигналу положення ротора з похідної струму

Нехтуючи взаємним електричним та магнітним впливом фаз ВРД, рівняння електричної рівноваги його обмоток можна записати так

$$u - iR - \frac{d\psi}{dt} = 0; \quad \psi = \int (u - iR) dt,$$

де u - напруга, що підводиться до обмотки ВРД; i - струм, що протікає по обмотці; R - активний опір; ψ - потокозчеплення обмотки.

При цьому, потокозчеплення можна розглядати, як функцію струму та кута повороту ротора бездатчикової ідентифікації положення ротора

ра ВРД $\psi(i, \theta) = L(i, \theta)i$. Таким чином, для виконання інжектування групи імпульсів напруги за допомогою відповідного керування ключами інвертора перед подачею струму в обмотку

$$L(i, \theta) = U_{dc} \left/ \left(\frac{di_{on}}{dt} - \frac{di_{off}}{dt} \right) \right.,$$

де $\frac{di_{on}}{dt}$, $\frac{di_{off}}{dt}$ - виміряні значення похідної струму при включенні на виключенні активного стану інвертора.

З вимірних значень індуктивностей обмоток ВРД шляхом диференціювання їх значень є можливим оцінювання величини крутного моменту M двигуна

$$M = \frac{i^2}{2} \frac{dL(i, \theta)}{d\theta}.$$

За рахунок оцінки зміни індуктивностей виконується визначення величин максимальної L_{max} та мінімальної індуктивності L_{min} , що у відповідності до рис. 1 дозволяє визначати положення ротора та моменти подачі струму в обмотки.

Оскільки положення ротора у даних умовах є величиною відомою, то подальше визначення величини кутової швидкості для використання в якості сигналу зворотного зв'язку виконується з використанням механічного положення ротора u_m , яке обчислюється з сигналу положення ротора в електричних градусах, з використанням відомого значення кількості полюсів машини

$$\omega = \Delta\theta_m / dt.$$

З метою перевірки роботоздатності запропонованих рішень була розроблена математична модель електромеханічної системи з ВРД у середовищі Matlab/Simulink (рис. 3). Результати моделювання (рис. 4) доводять, що, незважаючи на наявність невеликої похибки в оцінюванні кутової швидкості, дане технічне рішення дозволяє виконувати керування роботою машиною для забезпечення необхідних показників якості керування.

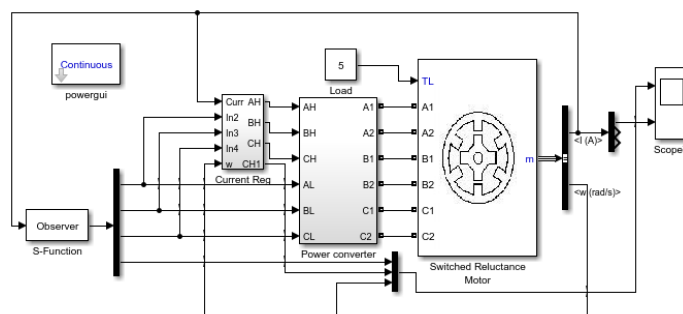


Рис. 3. Структура математичної моделі електромеханічної системи з вентильним реактивним двигуном та бездатковим оцінюванням положення ротора у середовищі Matlab/Simulink

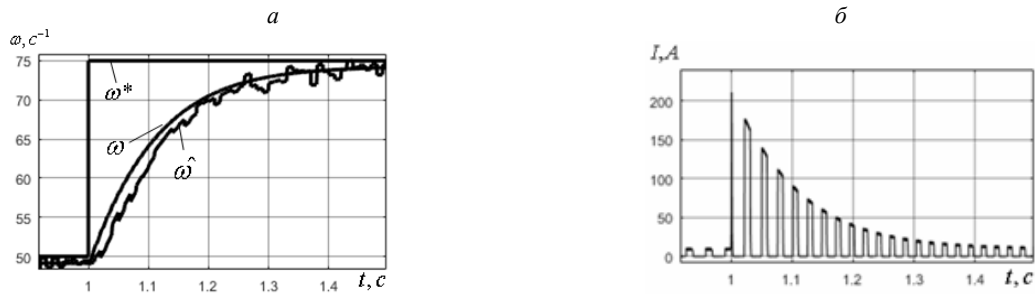


Рис. 4. Результати моделювання роботи запропонованої системи

Висновки та напрямок подальших досліджень. 1. Бездатчикове оцінювання кутової швидкості та положення ротора ВРД на основі виміру індуктивності обмоток при збудженні їх короткочасними імпульсами напруги при тому, що індуктивність розглядають як функцію струму та кута повороту ротора, та за відомих значень її максимальної та мінімальної величини дає можливість оцінювати механічні змінні стану електропривода без встановлення датчику на валу двигуна, що є суттєвим в контексті підвищення надійності тягових електромеханічних систем. 2. Проведений комплекс математичного моделювання підтвердив, що точність запропонованого методу ідентифікації є достатньою для забезпечення функціонування привода у всіх необхідних режимах.

Список літератури

1. Rongguang H. Sensorless control of switched reluctance motors based on high frequency signal injection / H. Rongguang, Z. Deng, J. Cai, C. Wang // 17th International conference on Electrical machines and systems, 2014, pp. 3558-3563.
2. Козакевич, І.А. Адаптивний спосіб компенсації нелінійних властивостей інвертора напруги для бездатчикового векторного керування на низьких частотах обертів [Текст] / І.А. Козакевич // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2014. – Вип. 1. – С. 19-25.
3. Садовой О.В. Вентильний реактивний електропривод з використанням позитивних зворотних зв'язків / О.В. Садовой, Ю.В. Сохіна, Є.В. Польовий // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. -- № 3. – С. 82-84.
4. Yousefi-Talouki A. Sensorless direct flux vector control of synchronous reluctance motor drives in a wide speed range including standstill / A. Yousefi-Talouki, G. Pellegrino // 2016 XXII International conference on electrical machines, 2016, pp. 1167-1173.
5. Синчук О.Н. Бездатчиковое векторное управление на основе анизотропных свойств машины / О.Н. Синчук, Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич // Электротехнические и компьютерные системы, К.: «Техника», № 15(91), 2014.
6. Козакевич І.А. Система бездатчикового векторного керування з використанням релейних регуляторів / І.А. Козакевич // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КрНУ, 2015, С. 80-82.
7. Синчук О. М. Дослідження систем бездатчикового векторного керування асинхронними двигунами з ковзним режимом при роботі на низькій кутовій швидкості / О. М. Синчук, Ю. Г. Осадчук, І. А. Козакевич // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2015. – № 12 (1121). – С. 150-154.
8. Осадчук, Ю.Г. Алгоритм компенсації ефекту "мертвого часу" в трьохрівневих інверторах напруги [Текст] / Ю.Г. Осадчук, І.А. Козакевич, І.О. Сінчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2010. – Вип. 1. – С. 38-41.
9. Козакевич, І.А. Дослідження адаптивних систем для бездатчикового керування асинхронними двигунами при роботі на низьких частотах обертів [Текст] / І.А. Козакевич // Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика. - 2014. - С. 29-31.
10. Сінчук, О.М. Аналіз способів покращення динамічних властивостей асинхронних електроприводів зі скалярним керуванням [Текст] / О.М. Сінчук, І.А. Козакевич, Д.О. Швидкий // Якість мінеральної сировини. Збірник наукових праць. - 2014. - С. 553.
11. Козакевич, І.А. Исследование адаптивного наблюдателя полного порядка для низких угловых скоростей двигателя [Текст] / И.А. Козакевич // Перспективы развития современной науки: Міжнародна науково-практична конференція: матеріали конференції. -- Херсон: Видавничий дім "Гельветика". - 2014. - С. 65-67.
12. Козакевич, І.А. Исследование адаптивного наблюдателя полного порядка для низких угловых скоростей двигателя [Текст] / И.А. Козакевич // Перспективы развития современной науки: Міжнародна науково-практична конференція: матеріали конференції. -- Херсон: Видавничий дім "Гельветика". - 2014. - С. 65-67.
12. Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics / J. J. Monaghan // Annual Review of Astronomy and Astrophysics. - Clayton, 1992. — P. 543–574.
13. Pande G., Beer G., Williams J.R. Numerical Modeling in Rock Mechanics/ G. Pande, G. Beer, J.R Williams.- John Wiley and Sons, 1990.
14. Williams J.R. O'Connor R. Discrete Element Simulation and the Contact Problem/ J.R. Williams, R.O'Connor// Archives of Computational Methods in Engineering, Vol. 6, 4,1999 - P. 279—304,
15. G R Liu, M B Liu. Smoothed Particle Hydrodynamics.A Meshfree Particle Method.-2003.-472pp

Рукопис подано до редакції 20.03.17