

БЕЗДАТЧИКОВЕ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМИ РЕАКТИВНИМИ ДВИГУНАМИ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

О.М.Сінчук¹, докт.техн.наук, І.А.Козакевич¹, канд.техн.наук, М.М.Юрченко², докт.техн.наук

¹ - ДВНЗ «Криворізький національний університет»,
вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, 50027, Україна,
e-mail: aerigor@gmail.com

² - Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

У роботі запропоновано бездатчикову систему керування вентильними реактивними двигунами, що можуть бути використані в структурі тягових електромеханічних систем. Даний варіант бездатчикового керування дозволяє спростити структуру електромеханічної системи, оцінюючи величину кутового положення ротора за вимірюваними електричними параметрами, виключаючи необхідність використання датчика положення на валу двигуна. Оцінка положення виконується з використанням ідентифікації зміни індуктивностей обмоток тягової електричної машини при подачі тестових імпульсів напруги. Запропоноване технічне рішення перевірено шляхом математичного моделювання. Бібл. 10, рис. 4.

Ключові слова: вентильний реактивний двигун, бездатчикове керування, регулювання струму, крутний момент.

Вступ. Вентильні реактивні двигуни (ВРД) займають гідне місце у практиці створення різноманітних видів електромеханічних систем і комплексів [2,5,8,10]. При цьому технологічність, масогабаритні показники, простота конструкції, низька собівартість при серійному виготовленні, відсутність обмоток чи постійних магнітів на роторі, висока надійність, ремонтпридатність та високий коефіцієнт корисної дії при регулюванні кутової частоти обертання у великому діапазоні дозволяють зробити висновок про те, що перспективним напрямком широкого використання ВРД є тягові електромеханічні комплекси широкого спектру електрифікованих видів транспортних засобів.

Актуальність теми дослідження. На підприємствах гірничо-металургійної галузі України з підземними способами видобутку корисних копалин експлуатується більше ніж 3 тис. одиниць 20-ти типів електровозів. Всі тягові електромеханічні комплекси рудникових видів електровозів обладнані двигунами постійного струму послідовного збудження. Такі комплекси струму є неефективними з точки зору енерговитрат та потребують заміни на більш сучасні, при розробці яких слід пам'ятати, що дані комплекси в підземних умовах рудників і шахт працюють у важких умовах та складно-підпорядкованих режимах експлуатації. Тому важливе значення має критерій простоти конструкції та відсутності додаткових контактних пристроїв, в т.ч. датчиків, необхідних для функціонування системи. Одним з найбільш суттєвих недоліків використання даного типу двигунів у тягових електромеханічних системах є необхідність вимірювання положення ротора [2,10] для здійснення струмового керування, що призводить до необхідності додаткового встановлення датчика на валу двигуна. В той самий час, як відомо [1,3], впродовж останнього десятиліття набули популярності бездатчикові методи керування, які дозволяють виконувати ідентифікацію положення ротора за вимірюваними електричними сигналами, що створює умови для виключення механічного датчика зі складу структури електромеханічної системи. Проте існуючі методи бездатчикового керування, в тому числі й ті, що були розроблені авторами раніше [4,9], орієнтовані на традиційні електричні машини змінного струму, а не на ВРД. У свою чергу, існуючі підходи щодо такого керування для ВРД передбачають необхідність завчасного визначення електричних параметрів обмоток двигуна та кривої намагнічування сталі машини в залежності від струму та кута повороту ротора [7], що ускладнює налаштування системи, призводить до зниження точності керування кутовою частотою обертання при зміні параметрів об'єкта регулювання, а у певних випадках і до втрати стійкості системи.

Мета дослідження. Розробка способу бездатчикової ідентифікації кутової частоти обертання та положення ротора вентильного реактивного двигуна тягової електромеханічної системи шляхом використання похідних струмів, що протікають в обмотках.

Матеріали досліджень. При роботі ВРД на кутовій частоті обертання, яка є меншою за номінальну, спостерігається (рис. 1) його початкове намагнічування при максимальній величині додатної напруги, створення крутного моменту при постійній величині струму, розмагнічення за негативної напруги.

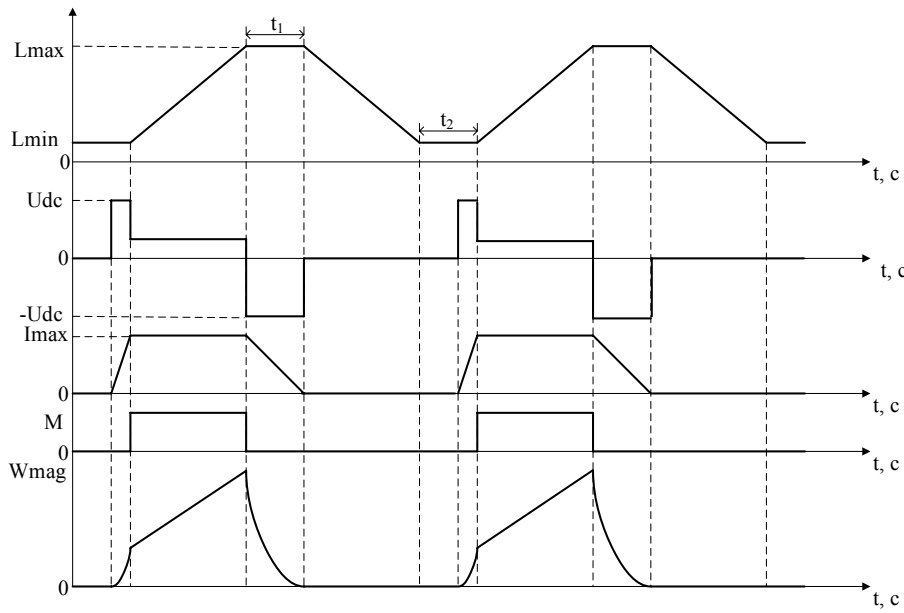


Рис. 1

На рис. 1 у верхній частині показано лінійну апроксимацію зміни індуктивності обмотки машини. При цьому приймається допущення щодо сталості величини даної індуктивності L_{\min} при відхиленні від невіривняного положення ротора не більше ніж на $t_2/2$, а також сталості 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 $dL/d\theta_e = \text{const}$, де θ_e – положення ротора ВРД у електричних градусах.

З рис. 1 видно, що крутний момент може бути створений лише за умови подачі струму в момент зміни індуктивності. Тому при роботі на кутовій частоті обертання, 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 намагнічування виконується з малою сталою часу, оскільки індуктивність є низькою, тому, приклавши до обмотки повну напругу ланки постійного струму (U_{dc}), можна досягти швидкого зростання струму до максимального значення I_{\max} . Як тільки обмотка буде збуджена струмом і індуктивність почне зростати, виникнуть умови для створення крутного моменту M . У цей період вихідна напруга перетворювача ВРД змінюється для забезпечення постійної величини струму, а потокозчеплення обмотки лінійно зростає, пропорційно до кількості енергії W_{mag} , що накопичується в магнітному полі обмотки.

Коли період зростання індуктивності закінчується, система керування переключається у режим розмагнічування котушки шляхом підключення її до негативної напруги ланки постійного струму ($-U_{dc}$). Оскільки в цей час індуктивність є більшою, ніж у невіривняному положенні, то процес розмагнічування потребує більше часу, ніж процес намагнічування. Завдяки цим процесам отримується імпульс крутного моменту M , причому крутний момент є нульовим при сталій 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 споживана приводом потужність витрачається на намагнічування. Отже, крутний момент у 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, звідки видно, що у 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 непрямой ідентифікації положення, де здійснюється усереднення частоти слідування імпульсів та розрахунок середньої частоти обертання ротора, а шляхом інтегрування – отримання оцінки кута повороту ротора.

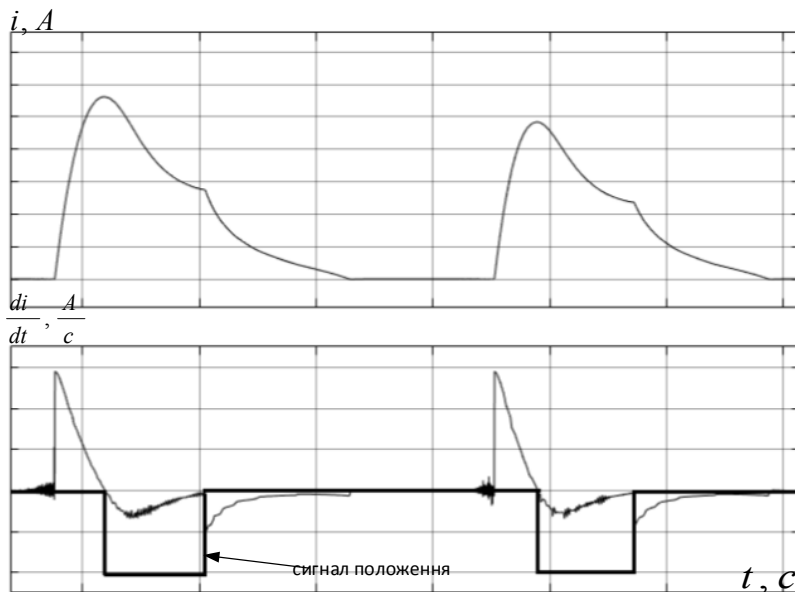


Рис. 2

ра необхідно подати групу імпульсів напруги за відповідного керування ключами інвертора живлення ВРД [6] перед подачею струму в обмотку. При цьому індуктивність може бути оцінена з урахуванням попередніх залежностей наступним чином:

$$L(i, \theta) = U_{dc} \left[\frac{di_{on}}{dt} - \frac{di_{off}}{dt} \right]^{-1},$$

де di_{on}/dt , di_{off}/dt – виміряні значення похідної струму при включенні та виключенні інвертора.

З вимірних значень індуктивності обмоток ВРД шляхом диференціювання їхніх значень можна оцінювати величини крутного моменту M двигуна

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

За рахунок оцінки зміни індуктивності 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 частоти обертання для використання її як сигналу зворотного зв'язку виконується з використанням розрахунку механічного положення ротора θ_m , яке обчислюється з сигналу положення ротора в електричних градусах, з урахуванням кількості полюсів машини

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

Була розроблена математична модель електромеханічної системи з ВРД у середовищі Matlab/Simulink, структуру якої показано на рис. 3. Дана модель складається з блоку бібліотеки SimPower System, що моделює роботу ВРД потужністю 60 кВт, який отримує живлення від силового перетворювача, представленого підсистемою Power Converter, що імітує роботу несиметричного мостового IGBT-інвертора. У підсистемі струмового керування Current Reg використовуються сигнали, що отримують від спостерігача стану Observer, виконаного у вигляді S-файлу, який реалізує запропонований у роботі підхід до ідентифікації невимірюваних змінних стану ВРД. Результати моделювання у вигляді графіків зміни у часі кутової частоти обертання (сигнал завдання – ω^* , реальне значення кутової частоти обертання ротора – ω , значення частоти, що отримане шляхом оцінювання за допомогою спостерігача стану – $\hat{\omega}$) та струму обмотки ВРД показано на рис. 4.

З них видно, що, незважаючи на наявність невеликої похибки ($\approx 0,6\%$) в оцінюванні кутової частоти обертів, запропонована бездатчикова система керування забезпечує необхідні для тягових електроприводів показники якості керування з точки зору точності та швидкодії.

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

$$u - iR - d\psi/dt = 0;$$

$$\psi = \int (u - iR)dt,$$

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

Потокозчеплення можна розглядати як функцію струму та індуктивності $L(i, \theta)$, що, в свою чергу, також є функцією кута повороту ротора ВРД та струму

$$\psi(i, \theta) = L(i, \theta)i.$$

Таким чином, для бездатчикової ідентифікації положення ротора

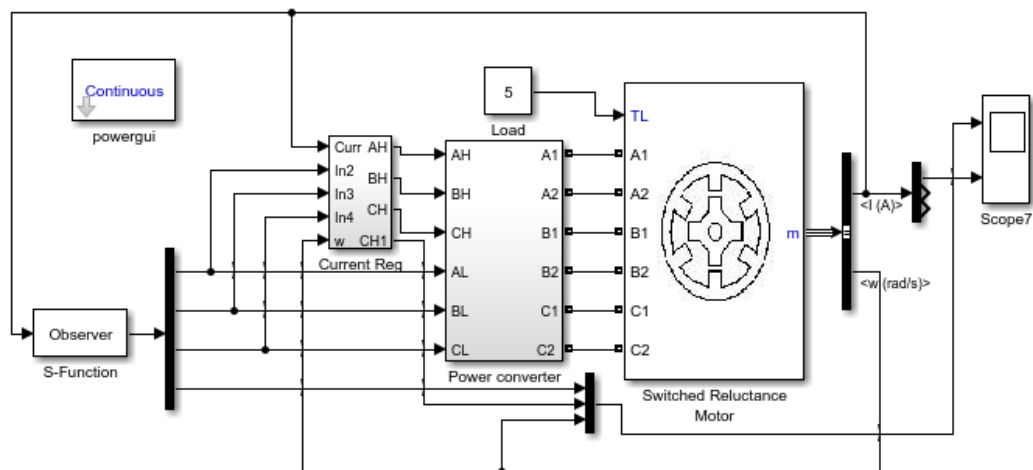


Рис. 3

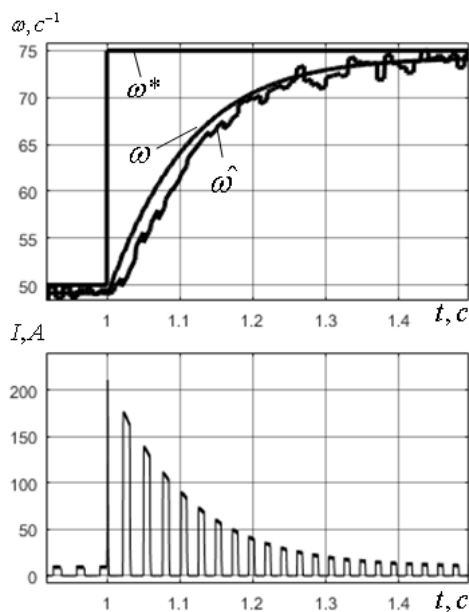


Рис. 4

Висновки. 1. Бездатчикове оцінювання кутової частоти обертання та положення ротора ВРД на основі вимірювання індуктивності обмоток при збудженні їх короткочасними імпульсами напруги, коли індуктивність розглядають як функцію струму та кута повороту ротора за відомих значень її максимальної та мінімальної величини, дає можливість оцінювати механічні змінні стану електроприводу без встановлення датчика на валу двигуна, що є суттєвим у контексті підвищення надійності тягових електромеханічних систем.

2. Проведений комплекс математичного моделювання підтвердив, що точність системи керування на основі запропонованого підходу ідентифікації невимірюваних змінних стану, є достатньою для забезпечення необхідного функціонування тягового електроприводу, оскільки наявна в динамічних режимах похибка визначення кутового положення не призводить до виникнення нестійких режимів.

1. *Козакевич І.А.* Система бездатчикового векторного керування з використанням релейних регуляторів / Збірник "Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика". – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 80–82.

2. *Садовой О.В., Сохіна Ю.В., Польовий Є.В.* Вентильний реактивний електропривод з використанням позитивних зворотних зв'язків // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – № 3. – С. 82–84.

3. *Сінчук О.Н., Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А.* Бездатчиковое векторное управление на основе анизотропных свойств машины // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. – № 15(91). – С. 45–47.

4. *Сінчук О.М., Осадчук Ю.Г., Козакевич І.А.* Дослідження систем бездатчикового векторного керування асинхронними двигунами з ковзним режимом при роботі на низькій кутовій швидкості // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ". Темат. вип. "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2015. – № 12 (1121). – С. 150–154.

5. *Donker R.D., Pulte D.W.J., Veltman A.* Advanced Electrical Drives. Analysis, modeling, control. – Springer Science + Business Media, 2011. – 447 p.

6. *Nakazawa Y., Ohyama K., Fujii H., Uehara H., Hyakutake Y.* Phase voltage estimation for position sensorless control of switched reluctance motor // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems. Chiba, Japan. – 2016. – Pp. 1–4.

7. *Peng F., Jin Ye, Ali Emadi.* Position sensorless control of switched reluctance motor based on numerical method // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Milwaukee, USA. – 2016. – Pp. 1–8.

8. *Rongguang H., Deng, J. Cai, Wang C.* Sensorless control of switched reluctance motors based on high frequency signal injection // 17th International conference on Electrical machines and systems. Hangzhou, China. – 2014. – Pp. 3558–3563.

9. *Sinchuk O., Kozakevich I., Kalmus D., Siyanko R.* Examining energy-efficient recuperative braking modes of traction asynchronous frequency-controlled electric drives // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems. – 2017. – No 1/1. – Pp. 50–56.

10. *Yousefi-Talouki A., Pellegrino G.* Sensorless direct flux vector control of synchronous reluctance motor drives in a wide speed range including standstill // 2016 XXII International conference on electrical machines. Lausanne, Switzerland. – 2016. – Pp. 1167–1173.

УДК 681.5:62-83

БЕЗДАТЧИКОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМИ РЕАКТИВНЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

О.Н.Синчук¹, докт.техн.наук, **И.А.Козакевич¹**, канд.техн.наук, **Н.Н.Юрченко²**, докт.техн.наук

¹- ГВУЗ «Криворожский национальный университет»,

ул. Виталия Матусевича, 11, Кривой Рог, 50027, Украина, e-mail: aepigor@gmail.com

²- Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина.

В работе предложена бездатчиковая система управления вентильными реактивными двигателями, которые могут быть использованы в структуре тяговых электромеханических систем. Данный вариант бездатчикового управления позволяет упростить структуру электромеханической системы, оценивая величину углового положения ротора по измеряемым электрическим параметрам, исключая необходимость использования датчика положения на валу двигателя. Оценка положения выполняется с использованием идентификации изменения индуктивностей обмоток тяговой электрической машины при подаче тестовых импульсов напряжения. Предложенное техническое решение проверено путем математического моделирования. Библи. 10, рис. 4.

Ключевые слова: вентильный реактивный двигатель, бездатчиковое управление, регулирование тока, крутящий момент.

SENSORLESS CONTROL OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS OF TRACTION ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

O.N. Sinchuk¹, **I.A. Kozakevich¹**, **N.N. Yurchenko²**

¹- State institution of higher education “Kryvyi Rih National University”,

Vitalii Matusevych str., 11, Kryvyi Rih, 50027, Ukraine, e-mail: aepigor@gmail.com

²- Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine.

In the paper a sensorless control system of switched reluctance motors, which can be used in the structure of traction electromechanical systems, is proposed. This modify of sensorless control allows to simplify the structure of the electromechanical system, estimating the magnitude of the rotor angular position using measured electrical parameters eliminating the need of use a position sensor on the motor shaft. The position estimating is performed using the identification of the change of winding inductances of the traction electric machine when the test voltage pulses are applied. The efficiency of the proposed solutions is proved by mathematical modeling. References 10, figures 4.

Key words: switched reluctance motor, sensorless control, current control, torque.

1. *Kozakevich I.A.* Sensorless vector control system using relay regulators / Zbirnyk "Problemy enerhoresursozberezhennia v elektrotekhnichnykh systemakh. Nauka, osvita i praktyka". – Kremenchug: KrNU, 2015. – Pp. 80–82. (Rus)

2. *Sadovoy O.V., Sohina Y.V., Polyovyi E.V.* Switched reluctance drive using positive feedback // Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. – 2011. – No 3. – Pp. 82–84. (Rus)

3. *Sinchuk O.N., Osadchuk Yu.G., Kozakevich I.A.* Sensorless vector control based on anisotropic properties of the machine // Electrotechnical and computer systems. – 2014. – No 15(91). – Pp. 45–47. (Rus)

4. *Sinchuk O.M., Osadchuk Yu.G., Kozakevich I.A.* Research of sensorless vector control of induction motors with sliding mode using at low speed // Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu "KhPI". Tematychnyi vypusk "Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriia i praktyka". – 2015. – No 12 (1121). – Pp. 150–154. (Ukr)

5. *Donker R.D., Pulle D.W.J., Veltman A.* Advanced Electrical Drives. Analysis, modeling, control. – Springer Science + Business Media, 2011. – 437 p.

6. *Nakazawa Y., Ohyama K., Fujii H., Uehara H., Hyakutake Y.* Phase voltage estimation for position sensorless control of switched reluctance motor // 19th International Conference on Electrical Machines and Systems. Chiba, Japan. – 2016. – Pp. 1–4.

7. *Peng F., Jin Ye, Ali Emadi.* Position sensorless control of switched reluctance motor based on numerical method // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Milwaukee, USA. – 2016. – Pp. 1–8.

8. *Rongguang H., Deng Z., Cai J., Wang C.* Sensorless control of switched reluctance motors based on high frequency signal injection // 17th International conference on Electrical machines and systems. Hangzhou, China. – 2014. – Pp. 3558–3563.

9. *Sinchuk O., Kozakevich I., Kalmus D., Siyanko R.* Examining energy-efficient recuperative braking modes of traction asynchronous frequency-controlled electric drives // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems. – 2017. – No 1/1. – Pp. 50–56.

10. *Yousefi-Talouki A., Pellegrino G.* Sensorless direct flux vector control of synchronous reluctance motor drives in a wide speed range including standstill // 2016 XXII International conference on electrical machines. Lausanne, Switzerland. – 2016. – Pp. 1167–1173.

Надійшла 06.12.2016
Остаточний варіант 26.05.2017