

УДК 621.3.078:681.532.55

**А.О. Лозинський, д-р техн. наук, Ю.О. Бобечко****СИНТЕЗ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЖОРСТКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА**

*Для створення бездатчикової системи керування вентильним реактивним двигуном (ВРД), яка забезпечує жорсткі механічні характеристики, синтезовано структуру штучної нейронної мережі (ШНМ) прямого поширення сигналу, входними величинами якої є фазні струми. Методом комп'ютерного моделювання досліджено роботу бездатчикової системи керування з використанням синтезованої ШНМ.*

**Ключові слова:** нейрорегулятор, вентильний реактивний двигун, штучна нейронна мережа, жорстка механічна характеристика, бездавачева система керування.

**А.О. Lozynsky, ScD, Y.O. Bobechko****NEURO-CONTROLLER SYNTHESIS TO FORM A FLAT SPEED-TORQUE CHARACTERISTICS OF SWITCHED RELUCTANCE MOTORS**

*To create a sensorless control system of switched reluctance motors (SRM) that provides a flat speed-torque characteristics, a feed-forward artificial neural network (ANN), that uses currents as the input signals, was synthesized. By computer modeling the work of the sensorless control system using created ANN was researched.*

**Keywords:** neuro-controller, switched reluctance motor, artificial neural network, flat speed-torque characteristic, sensorless control system.

**А.О. Лозинский, д-р техн. наук, Ю.О. Бобечко****СИНТЕЗ НЕЙРОРЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЖЕСТКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Для создания бездатчиковой системы управления вентильным реактивным двигателем (ВРД), которая обеспечивает жесткие механические характеристики, синтезирована структура искусственной нейронной сети (ИНС) прямого распространения сигнала, входными величинами которой являются фазные токи. Методом компьютерного моделирования исследована работа бездатчиковой системы управления с использованием синтезированной ИНС.*

**Ключевые слова:** нейрорегулятор, вентильный реактивный двигатель, искусственная нейронная сеть, жесткая механическая характеристика, бездатчиковая система управления.

Вентильні реактивні двигуни (ВРД), відомі у світі як SRM (switched reluctance motors), набули широкого застосування у різноманітних електроприводах завдяки простій будові, високому коефіцієнту корисної дії, високій надійності, широкому діапазону робочих швидкостей, можливості роботи в агресивних середовищах і при високих температурах, оптимальних умов охолодження тощо.

З іншого боку, до часто згадуваних недоліків цього типу двигунів належать пульсації крутного моменту, акустичні шуми і необхідна наявність датчика положення ротора [5,8].

У теперішній час перспективними залишаються дослідження зі створення бездатчикових систем керування вентильним реактивним двигуном на основі інтелектуальних підходів. Зокрема, значна увага для ідентифікації параметрів та керування ВРД приділяється використанню штучних нейронних мереж. Ряд авторів [4,6,7] використовує

штучні нейронні мережі прямого поширення, які дають змогу за вимірними фазними струмами і потокозчепленням можуть оцінити положення ротора і уникнути застосування датчика положення ротора (ДПР).

При використанні таких систем керування ВРД працює на природній механічній характеристиці, що не завжди задовольняє вимоги умов застосування. Тому створення регульованого електроприводу з використанням ШНМ – актуальна задача.

Метою даної роботи є розробка бездатчикової системи керування ВРД з використанням принципів теорії нейронних мереж, яка від наявних систем буде відрізнятися простішою структурою, вимагатиме меншої кількості вимірювань, але при цьому забезпечуватиме високі техніко-економічні показники і жорсткість механічної характеристики. Створення такої бездатчикової системи керування дасть змогу підвищити надійність та знизити вартість двигуна, розширити сферу його використання.

© Лозинський А.О., Бобечко Ю.О., 2011

Окрім традиційного способу регулювання за допомогою регулятора напруги, увімкненого послідовно між джерелом живлення та електронним комутатором, частоту обертання ВРД можна змінювати шириною керуючого імпульсу. Оскільки вона визначається величинами кутів вмикання секції  $\beta$  та інтервалу комутації  $\gamma$ , то, регулюючи їх, як показали дослідження, можна отримати жорсткі механічні характеристики двигуна.

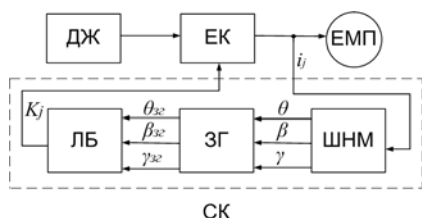


Рис. 1. Структурна схема ВРД, в якому система керування базується на використанні штучної нейронної мережі

На рис.1 наведено схему ВРД для формування жорстких механічних характеристик. Вентильний реактивний двигун являє собою електромеханотронний перетворювач, який складається з електромеханічного перетворювача (ЕМП), електронного інвертора (комутатора) (ЕК) та бездавачевої системи керування (СК). Система керування в свою чергу складається із навченої ШНМ, значення вихідних величин якої згладжуються (ЗГ) і подаються на логічний блок (ЛБ), де формуються сигнали ключів керування.

Розглянемо синтез ШНМ бездатчикової системи керування ВРД для формування жорстких механічних характеристик. Для отримання працездатної ШНМ слід:

- вибрати архітектуру мережі;
- сформувати навчальну базу даних;
- навчити мережу на основі отриманої бази даних.

**Вибір архітектури ШНМ.** Архітектура мережі складається з опису інформації про з'єднання шарів, кількість шарів, кількість нейронів у кожному шарі, виду функції активації кожного шару. Першим етапом вирішення поставленого завдання був вибір структури нейронної мережі та її архітектури, зокрема вхідних та вихідних величин для нейронної мережі, а, відповідно, і кількості нейронів вхідного та вихідного шарів.

Запропоновано використовувати мережу прямого поширення сигналу (рис.2), основ-

ними перевагами якої є простота у використанні і можливість апроксимації будь-якої характеристики. Вхідними даними після аналізу чутливості вихідних величин до зміни вхідних були вибрані струми фаз, вихідними – кут положення ротора  $\theta$ , кути вмикання та комутації секції.

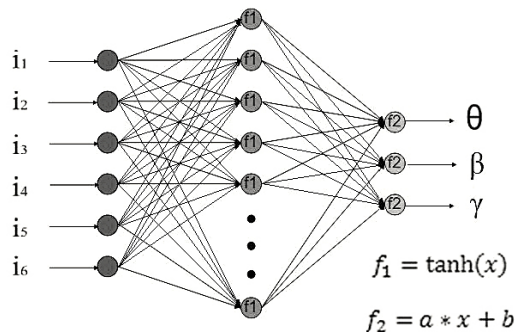


Рис. 2. Архітектура нейронної мережі прямого поширення сигналу

На наступному етапі здійснено вибір кількості прихованих шарів та активаційних функцій нейронів мережі прямого поширення сигналу. Як відомо [1], для більшості задач відтворення залежностей вхід-вихід достатньо використовувати нейронну мережу прямого поширення сигналу з одним прихованим шаром. Для даного типу НМ характерним є використання в прихованому шарі сигмоїдних активаційних функцій, зокрема: гіперболічний тангенс і логістична функція. Це забезпечує хороші умови для процедур навчання. Для навчання використовується метод зворотного розповсюдження похибки (Backpropagation Methode).

*Формування навчальної бази даних, навчання мережі та тестування на отриманих даних.* Щоб навчити нейронну мережу прямого поширення сигналу, необхідна велика кількість навчальних даних (як правило, в три рази більше навчальних вибірок, ніж ваг мережі). Для отримання потрібних даних використано автоматизовану систему дослідження ВРД, розроблену на кафедрі ЕМА НУ «Львівська політехніка». Дослідження для синтезу нейронної мережі для керування ВРД були проведені на моделі шестисекційного ВРД при таких даних: напруга живлення,  $U = 60$  В; корисна потужність – 271 Вт; частота обертання – 330 об/хв.; коефіцієнт корисної дії – 74 %; момент навантаження,  $M = 4,32$  Н·м.

Щоб сформувати дані для навчання нейронної мережі, було знято характеристики з моделі ВРД при різних напругах живлення, моментах навантаження, кутах вмикання та комутації секції. Напруги змінювалися в діапазоні 0.33, 0.67,...1.33 U; моменти навантаження – застосовані 0.5, 0.6,...1.5 М; кути вмикання – застосовані 0,10,...60 ел. град; інтервали комутації – застосовані 60, 70,...160 ел. град. При цьому необхідно враховувати обмеження сумарного значення кутів вмикання та комутації ( $\beta + \gamma < 165$  ел. град) [2].

Після аналізу отриманих даних для кожної комбінації напруги і моменту навантаження з міркувань забезпечення жорсткості механічної характеристики і високого ККД був ли рекомендований кут вмикання секції та інтервал комутації. Надалі використовувалися лише характеристики, зняті при цих величинах кутів. Таким чином отримали навчальну базу даних, в яку входять фазні струми, кут положення ротора, кути вмикання та комутації секції.

Дані для навчання було поділено на три категорії:

- тренувальні дані: використовуються для тренування мережі (близько 75 % даних);

- дані для кросс-перевірки: використовуються для активного тестування мережі протягом тренування і для зупинки тренування (близько 15 % даних);

- дані для тестування: використовуються для тестування нейронної мережі після тренування.

Оскільки немає точного способу, щоб попередньо вибрати оптимальну кількість нейронів прихованого шару, то для цього було навчено і протестовано мережі з активційною функцією гіперболічний тангенс і кількістю нейронів від 2 до 24 (рис.3). Критерій навчання – мінімізація середнього квадрата похибки (MSE).

Як видно з рис.3, штучна нейронна мережа демонструє найменші похибки при навчанні, коли кількість нейронів прихованого шару перебуває в межах від 15-ми до 17-ти. Проте враховуючи незначну різницю точності результатів, з міркувань зменшення структури мережі і забезпечення певного резерву

обчислювальних ресурсів було вибрано 10 нейронів у прихованому шарі.

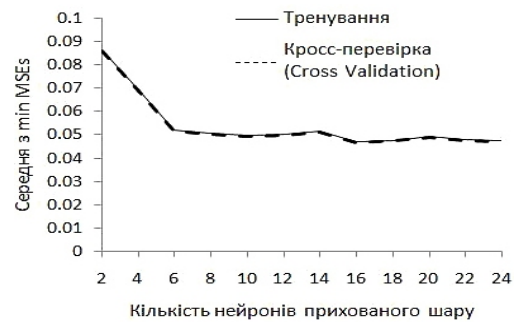


Рис.3. Визначення оптимальної кількості нейронів прихованого шару

Тестування навченої нейронної мережі проведено на даних, які не використовувалися при навчанні: напрузі живлення, що дорівнює 0.83 від номінальної, і моменту навантаження – 0.37 від номінального. Середня абсолютна похибка після тестування (MAE): для кута вмикання – 5.843 ел.град, для інтервалу комутації – 7.422 ел. град, для кута положення ротора – 15.985 ел. град.

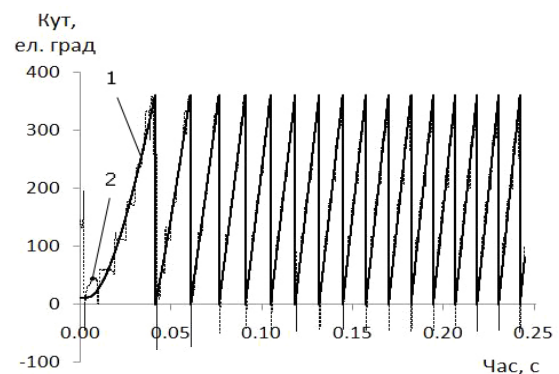


Рис. 4. Кут положення ротора, визначений автоматизованою системою дослідження ВРД (1), та кут, визначений нейронною мережею (2)

З рис. 4 і 5 видно, що мережа дає результат, що суттєво відрізняється від еталонного, перші 0.05 с. Тому для пуску ВРД протягом цього часу використовуються інші методи, наприклад пуск у кроковому режимі.

Тестування навченої ШНМ в режимі реального часу. Навчену ШНМ було реалізовано алгоритмічною мовою ФОРТРАН для використання в автоматизованій системі дослідження ВРД.

Оскільки вихідні величини нейронної мережі сильно зашумлені, то під час роботи системи до них застосовується згладжуван-

ня. Один з найпростіших, але ефективних і легко реалізованих непараметричних методів є ядерне згладжування [3].

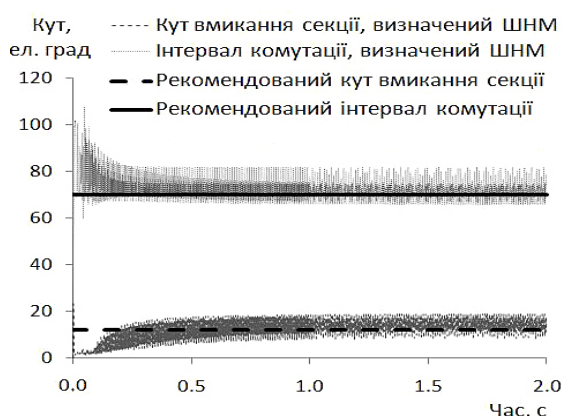


Рис. 5. Кути вмикання і комутації секції, визначені нейронною мережею і рекомендовані для формування жорстких механічних характеристик

Для проведення досліджень обрано ядерне згладжування з ядром Гауса і підібрано оптимальну ширину вікна для кута положення ротора, кута вмикання та комутації секції ВРД. Оскільки оцінювання відбувається в режимі реального часу, то для забезпечення достатньої точності і одночасно зменшення обчислювальних затрат згладжування ведеться по 101 точці, при чому обчислюється нове значення для кожної 50-ї точки із цієї групи. Затримка в часі на 101 ітерацію, якщо крок інтегрування за часом  $10^{-5}$  с, практично не впливає на ефективність роботи системи.

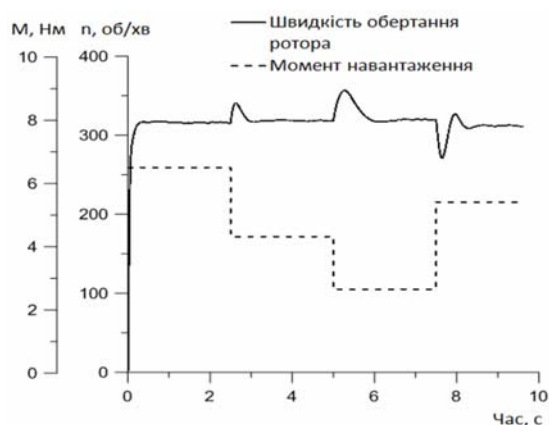


Рис. 6. Швидкість обертання при змінах моменту навантаження на валу ВРД і номінальній напрузі живлення, коли для ідентифікації кутів положення ротора, вмикання і комутації використовується навчена нейронна мережа

Методом комп'ютерного симулювання досліджено роботу системи з нейромережовим ідентифікатором кута повороту ротора, вмикання та комутації секції.

Як видно з рис.6, застосування вище описаної нейронної мережі забезпечує стабілізацію швидкості ВРД.

На рис.7 показано, як нейронна мережа регулює кут вмикання секції та інтервал комутації для стабілізації частоти обертання.

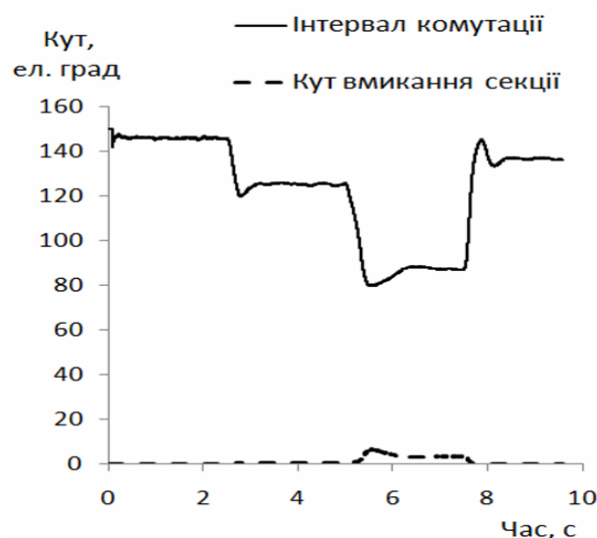


Рис.7. Кути вмикання та комутації секції, визначені нейронною мережею при змінах моменту навантаження на валу ВРД

Після проведення вимірювань швидкості обертання при різних моментах навантаження і напругах без і з нейронною мережею побудовано відповідно природну і штучну механічні характеристики (рис.8).

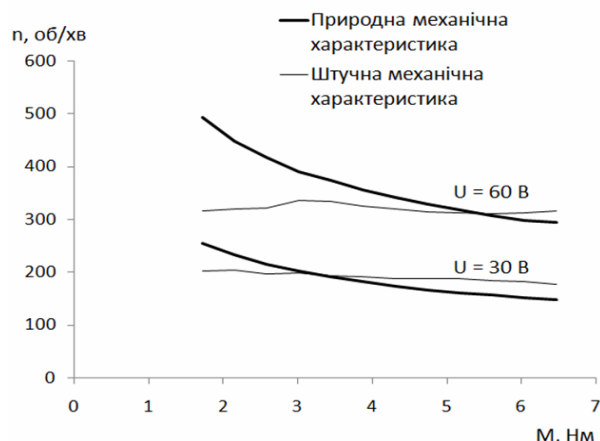


Рис. 8. Природна і штучна механічні характеристики ВРД при напругах живлення 60 і 30 В

Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити такі висновки:

– використання штучних нейронних мереж дозволяє побудувати бездавачеву систему керування ВРД, яка забезпечує жорсткі механічні характеристики;

– синтезована структура нейронної мережі дає змогу визначати положення ротора, кутів вмикання та комутації секції для квазіусталених та перехідних режимів роботи ВРД.

#### Список використаної літератури

1. Осовський С. Нейронні мережі для обробки інформації / С.Осовський. – М.: Фінанси й статистика, 2004. – 344 с.

2. Ткачук В. Електромеханотроніка: Навчальний посібник / В. Ткачук. – Львів: Видав. Національного ун-ту “Львівська політехніка”, 2001. – 404 с.

3. Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия / В.Хардле – М.: Мир, 1993. – 349 с.

4. Enayati B. Sensorless position control of switched reluctance motors based on artificial neural networks / B. Enayati, S.M. Saghaiannejad // IEEE ISIE, Montreal, Canada, July 9-12, 2006. – P. 2266-2271.

5. Miller T. J. E. Switched Reluctance Motors and Their Control / Miller T. J. E. – Oxford, UK: Magna Physics Publishing, 1993.

6. Position sensorless control of a SRM drive using ANN-Techniques / A. Bellini, F. Flipetti, G. Franceschini, C. Tassoni, P. Vas // In Proc. IEEE IAS Annu. Meeting, 1998. – Pp. 533–539.

7. Reay D.S., Williams B.W. Sensorless position detection using neural networks for the control of switched reluctance motors / Proc. IEEE Int. Conf. Contr. Applicat. – Vol. 2. – 1999. – P. 1073–1077.

8. Variable-speed switched reluctance motors / P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blekinsop, J.Corda, N.N. Fulton // In Proc. Inst.Elect. Eng. B. – Vol. 127, July 1980. – P. 253–265.

Отримано 23.10.2011

#### References

1. Osovsky C. Neural networks for information processing. – Moskou: Finances and Statistics, 2004. – 344 p. [in Russian].

2. Tkachuk V. Elektromehanotronika: Manual – Lviv: Publishing House of the National University "Lviv Polytechnic", – 2001. – 404 p. [in Russian].

3. Hardle B. Applied neparametrycheskaya rehressyya. – Moscow: Mir, 1993. – 349 p. [in Russian].

4. Enayati B., Maghaiannejad S.M. Sensorless position control of switched reluctance motors based on artificial neural networks // IEEE ISIE, Montreal, Canada, July 9-12, 2006. – P. 2266-2271 [in English].

5. Miller T. J. E. Switched Reluctance Motors and Their Control / – Oxford, UK: Magna Physics Publishing, 1993 [in English].

6. Bellini A., Flipetti F., Franceschini G., Tassoni C., Vas P. Position sensorless control of a SRM drive using ANN-Techniques, // In Proc. IEEE IAS Annu. Meeting, 1998. – P. 533–539 [in English].

7. Reay D.S., Williams B.W. Sensorless position detection using neural networks for the control of switched reluctance motors / Proc. IEEE Int. Conf. Contr. Applicat. – Vol.2. – 1999. – P. 1073-1077 [in English].

8. Lawrenson P.J., Stephenson J.M., Blekinsop P.T., Corda J, Fulton N.N. Variable-speed switched reluctance motors / In Proc. Inst.Elect. Eng. B. – Vol. 127, July. – 1980. – Pp. 253-265 [in English].



Лозинський  
Андрій Орестович,  
д-р техн. наук, проф.  
каф. електричних ма-  
шин та апаратів  
Нац. ун-ту “Львівська  
політехніка”



Бобечко  
Юрій Остапович,  
аспірант каф. елек-  
тричних машин та  
апаратів  
Нац. ун-ту “Львівська  
політехніка”,  
тел.: +38-098-129-50-20