

УДК 621.313.292

Т.І.Михайлович

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГУНА БЕЗ ДАВАЧА ПОЛОЖЕННЯ РОТОРА**

Для проведення досліджень роботи вентильного реактивного двигуна (ВРД) з фаззи-регулятором для непрямого визначення положення ротора створено експериментальну установку та синтезовано нечіткий регулятор. Досліджено роботу ВРД без давача положення ротора в квазіусталених, перехідних режимах та в режимі пуску на фізичній моделі.

**Ключові слова:** вентильний реактивний двигун, фаззи-логіка, бездавачева система керування.

Т.І.Мухайлович

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF SWITCHED RELUCTANCE MOTOR WORK WITHOUT POSITION SENSOR**

To perform researches of switched reluctance motor (SRM) with fuzzy-controller for indirect rotor position estimation the experimental setup was prepared. The behaviors of SRM in different operating modes, including start-up, on experimental setup were performed.

**Keywords:** switched reluctance motor, fuzzy-logic, sensorless control system.

Т.И.Михайлович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕНТИЛЬНОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ БЕЗ ДАТЧИКА ПОЛОЖЕНИЯ РОТОРА**

Для проведения исследований работы вентильного реактивного двигателя (ВРД) с фаззи-регулятором для косвенного определения положения ротора создана экспериментальная установка и синтезирован фаззи-регулятор. Исследована работа ВРД без датчика положения ротора в квазиусталених и переходных режимах, а также в режиме пуска на физической модели.

**Ключевые слова:** вентильный индукторный реактивный двигатель, фаззи-логіка, бездатчиковая система управления.

**Постановка проблеми досліджень**

Високоєфективна робота вентильних реактивних двигунів (ВРД) вимагає точної інформації про положення ротора як під час зупинки, так під час різних режимів роботи з різними швидкостями. У традиційних схемах положення ротора визначається за допомогою давача положення ротора (ДПР), що являє собою окрему електричну машину, прилаштовану на валу двигуна. ДПР збільшує габарити двигуна і вартість системи в цілому. Також давач положення ротора є ненадійним вузлом у разі роботи на великих швидкостях, при високих температурах або в середовищі, де присутні електромагнітні завади. Ще однією проблемою, що виникає при використанні давача положення ротора, зокрема оптичного енкодера, є стартове коливання, спричинене початковою невизначеністю положення ротора [1], що є недопустимим явищем у високопродуктивних системах.

**Аналіз останніх досліджень**

На даний час в літературі описано ряд непрямих методів для визначення положення ротора [6–8]. Більшість з них, з врахуванням особливостей будови ВРД ґрунтується на зміні індуктивності фази в залежності від кута положення ротора. На нашу думку, кращими є методи непрямого визначення положення ротора, які базуються на теорії нечітких множин та нейронних мереж. Вони характеризуються вищою точністю, здатні працювати у різних діапазонах швидкостей.

**Мета роботи**

Перевірка системи керування ВРД без ДПР, побудованої на основі принципів теорії нечітких множин та запропонованого підходу до синтезу нечітких регуляторів [2–4], а також алгоритму визначення початкового положення ротора [1] на експериментальній установці.

**Виклад основного матеріалу**

*Структура експериментальної установки.* Для досягнення поставленої мети на першому етапі необхідно створити експери-

ментальний стенд для проведення досліджень.

Він складається з таких елементів (рис.1):

силовий блок живлення (СБЖ); електро-механічний перетворювач (ЕМП); електронний комутатор (ЕК); навантажувальний пристрій (НП); датчі струму на основі ефекту Холла (ДХ); плата ЦАП/АЦП; комп'ютер з програмним забезпеченням (ПК).

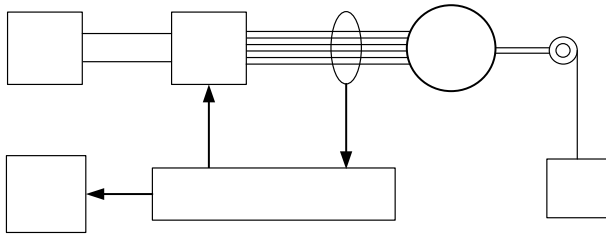


Рис. 1. Структурна схема експериментальної установки

Електромеханічний перетворювач складається із статора з U-подібним осердям (рис. 2) та явнополюсного суцільного ротора.

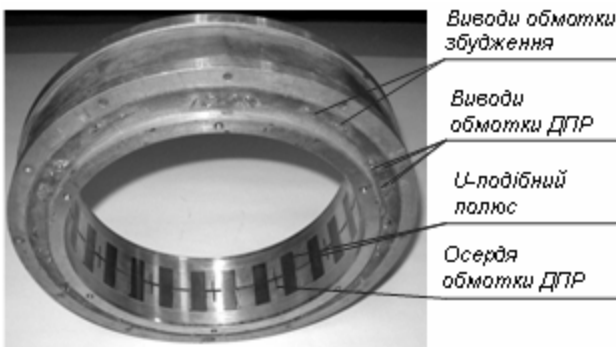


Рис. 2. Статор ЕМП

Статор електромеханічного перетворювача має U-подібні полюси, на яких розміщено обмотки збудження, та П-подібних осердь, на яких розміщені сигнальна обмотка та обмотка збудження датча положення ротора. Осердя з обмотками зафіксовані за допомогою утримуючих кілець та залиті компаундом. Ротор ЕМП виконаний суцільним для задовільного проведення магнітного потоку як в тангенціальному, так і в аксіальному напрямку. Головні параметри двигуна наведено нижче:

- Напруга живлення 60 В.
- Корисна потужність 371 Вт.
- Момент навантаження 5 Н·м.

Конструктивне виконання статора U-подібний.

Кількість зубців статора 24.

Кількість зубців ротора 22.

Момент інерції ротора 0,0497кг·м<sup>2</sup>.

Номинальна частота обертання 100 об/хв.

Кількість секцій 6.

На роторі двигуна закріплений шків діаметром 100 мм для створення навантаження методом сухого тертя. Момент навантаження розраховується

$$M = 9.81 \cdot F \cdot \frac{D}{2}$$

де  $F$  – маса гирьок (кг),  $D$  – діаметр шків навантажувального пристрою, (м).

Силовий блок живлення складається з трифазного автотрансформатора, некеро-ваного випрямляча та згладжувального конденсатора, що дозволяє плавно змінювати напругу живлення від  $0,1 \cdot U_n$  до  $1,2 \cdot U_n$ .

Для оцифрування сигналів датчів струму та керування силовими ключами використано плату ЦАП/АЦП –DAS1600.

Електронний комутатор конструктивно складається з трьох частин (рис. 3): плати з силовими ключами, плати з драйверами силових ключів та плати підсилення сигналів керування.

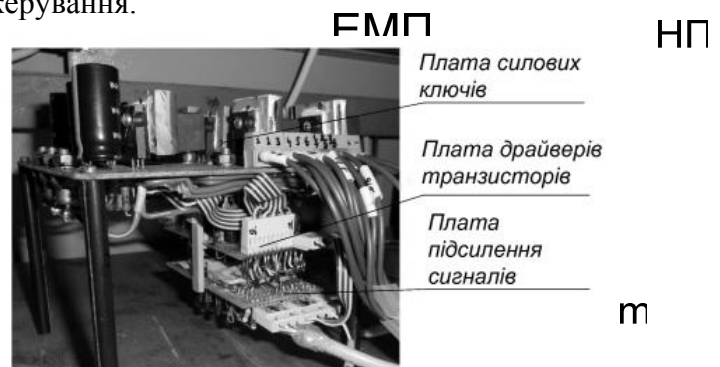


Рис. 3. Електронний комутатор

Для силових ключів вибрано польові N-каналні транзистори IRFP 240 фірми FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. Для формування сигналів керування транзисторами відповідної амплітуди та форми використано, так звані, драйвери транзисторів – IR2117 фірми International Rectifier. Окрім вище перелічених завдань вони забезпечують гальванічну розв'язку вхідних та вихідних сигналів.

Сигнали керування з комп'ютера передаються через цифровий порт плати DAS1600 зі стандартними рівнями напруг. Тому для узгодження рівнів цих сигналів (0,5–4,7 В) з рівнем вхідних сигналів драйверів транзисторів (9,5 В) виконано плату підсилення сигналів.

Для вимірювання фазних струмів використано датчик Холла ASC 712 фірми Allegro, що забезпечують перетворення значення струму в пропорційну напругу з чутливістю 100 мВ/А.

Електронний комутатор виконаний за непереривною схемою з буферами енергії та окремими підживлювальними ключами в кожній секції. Ємнісні накопичувачі енергії забезпечують зниження напруги на ключах у момент комутації, утилізацію енергії, яка запасється в електромагнітному полі якоря ЕМП [5], та зумовлюють форсоване наростання струму секції. Враховуючи кількість секцій та той факт, що одночасно можуть працювати лише дві суміжні секції, автори обмежились трьома буферами енергії.

*Синтез нечіткого регулятора досліджуваного двигуна для непрямого визначення положення ротора.* Нечіткий регулятор буде розроблено за алгоритмом представленим у [4]. Для набору даних та синтезу регулятора скористаємось програмним пакетом [3]. В результаті отримано дуже громіздку базу правил. Для спрощення структури регулятора та підвищення швидкодії системи отриману базу даних було розбито на окремі області за допомогою методу К-середніх значень та визначено їхні центри. В якості функцій належності використано трикутні, оскільки вони характеризуються простотою параметрів та забезпечують суму функцій належності для кожного конкретного значення рівною 1. Для зменшення бази правил функції належності розміщені не симетрично, тобто їх вершини знаходяться в середині діапазонів з найбільшою густиною розподілу вихідної величини фаззи-регулятора. Регулятор синтезуємо типу Такагі - Сугено, що передбачає наступний вигляд фаззи-правил: *якщо "i ∈ A<sub>1</sub>" і "di/dt ∈ A<sub>2</sub>" тоді "dθ/dt = const"*. Для дефазифікації використано спрощений гравітаційний метод. Синтезований фаззи-регулятор має 38 фаззи-правил, котрі можна розбити на

три групи: 26 з фаззи-правил для визначення похідної положення ротора, 6 – для врахування зміни напруги живлення та 6 фаззи-правил алгоритму визначення початкового положення ротора.

*Експериментальне підтвердження алгоритму визначення початкового положення ротора.* Перед початком досліджень на двигун нанесено градусну сітку з кроком, рівним одному елементарному кроку, та закріплено показчик на шківі двигуна (рис.4), що дає змогу виставити ротор у відоме положення.



Рис. 4. Двигун з градусною сіткою

Як показано в [1], для визначення початкового положення ротора використовується відношення струмів фаз статора, що робить алгоритм нечутливим до напруги живлення. Тому проведено дослідження з напругами живлення, відмінними від номінальної. Перед запуском програми ротор виставлявся у наперед задане положення. Результати досліджень зведено в таблиці, де представлені струми секцій та кути положення ротора, попередньо задані та визначені за допомогою алгоритму ( $\theta_0^\circ$  – попередньо виставлене положення ротора,  $\theta^\circ$  – визначене значення початкового положення ротора). Відносне значення похибки між визначеним та заданим положенням ротора не перевищує 10 % в усьому діапазоні кутів положення ротора та при різних напругах живлення.

Оскільки алгоритм непрямого положення ротора починає працювати після подачі першого імпульсу, точності в 10 % цілком достатньо для визначення секції, з якої потрібно почати збуджувати двигун для забезпечення надійного пуску та уникнення стартового коливання ротора. На рис. 5 показана осцилограма струму секції у разі пуску з такими параметрами: напруга живлення –  $0,8 \cdot U_n$ , момент навантаження – 3 Н·м.

1. Результати дослідження початкового визначення положення ротора

I, A	Напруга живлення, В						
	15	25	40	42	45	55	65
$I_1$	0,45	0,77	0,35	0,28	0,33	1,05	0,52
$I_2$	0,56	0,39	0,27	0,36	0,24	0,92	0,68
$I_3$	0,37	0,36	0,38	0,8	0,41	0,59	1,61
$I_4$	0,29	0,38	0,49	1,24	0,58	0,45	1,56
$I_5$	0,18	0,35	1	0,69	1,18	0,42	0,85
$I_6$	0,37	0,74	1,14	0,55	1,1	0,78	0,8
$K$	1,22	1,91	2,86	1,14	0,526	0,851	0,439
$\theta^\circ$	61	357	293	181	249	5	130
$\theta_0^\circ$	60	360	270	200	240	0	140

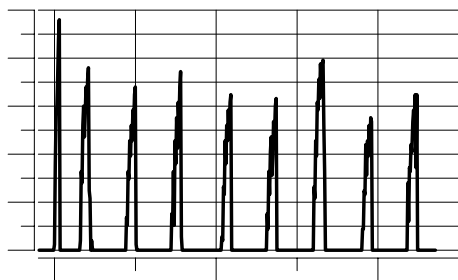


Рис. 5. Осцилограма струму секції

Перший імпульс струму відповідає моменту, коли короткочасно збуджуються усі фази двигуна. Далі система визначає початкове положення ротора та подає сигнали керування. Амплітудні значення струму секції відрізняються, що пояснюється нестабільністю навантаження типу сухе тертя. Оскільки двигун тихохідний, то він виходить у квазіусталений режим роботи після кількох електричних періодів. Швидкість обертання 50 об/хв.

Експериментальне дослідження в квазіусталеному та перехідних режимах роботи. Для проведення досліджень синтезований нечіткий регулятор був реалізований програмно. Як видно зі структури програми (рис.6), після визначення початкового положення ротора система визначає стан ключів.

Далі працює алгоритм непрямого визначення положення ротора, який на основі

струмів фаз та значення напруги живлення визначає положення ротора. Програма дослідження не передбачає використання будь-якого регулювання швидкості для формування характеристик. Двигун керується фіксованими значеннями кутів комутації. При дослідженнях кут комутації  $\gamma - 130^\circ$  ел., кут випередження комутації  $\beta - 2^\circ$  ел. Спершу проведемо дослідження роботи двигуна в квазіусталеному режимі при номінальній напрузі живлення та різних моментах навантаження.

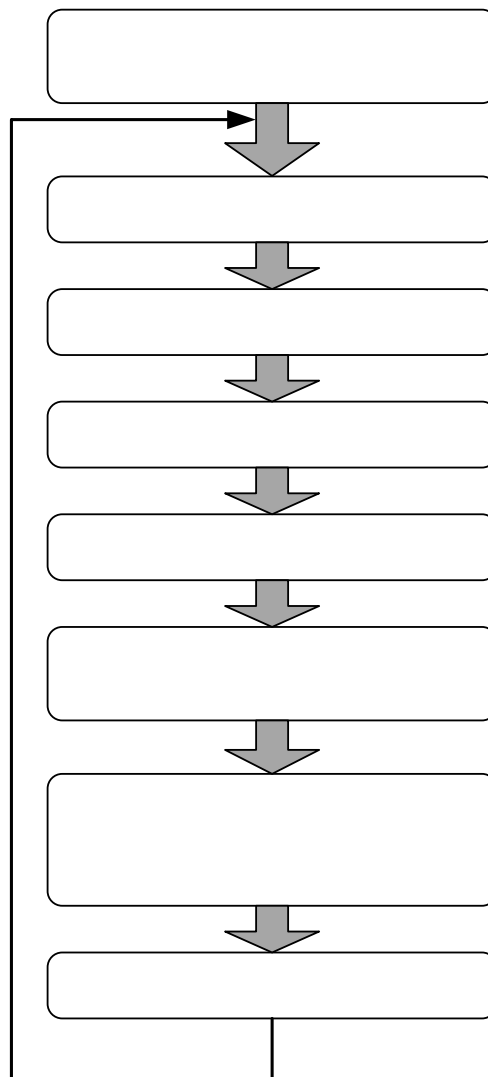
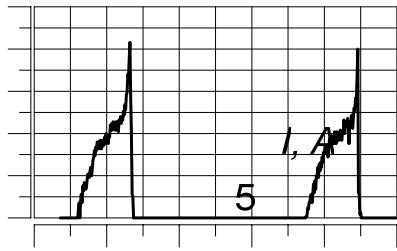


Рис. 6. Структура програми

При навантаженні 4 Н·м двигун досягає частоти обертання 45 об/хв. Низька частота обертання пояснюється неоптимальним налаштуванням параметрів комутації та відсутністю системи керування верхнього рівня.

Струм секції (рис. 7) має типову форму для ВДР.



4

Рис. 7. Струм секції ВРД при  $U_n$  та  $0,8 \cdot M_n$

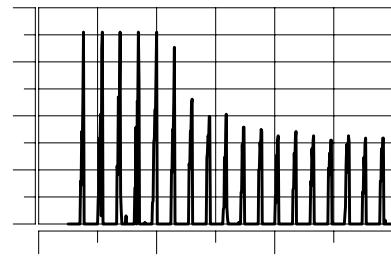
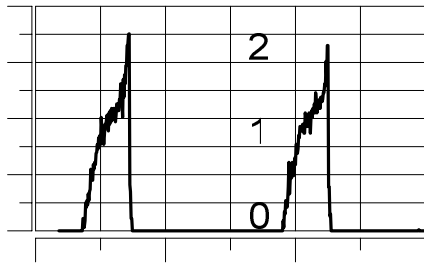
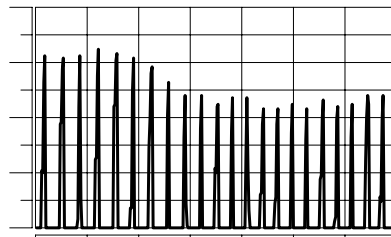


Рис. 9. Струм секції при зміні напруги живлення



2.04 2.06

Рис. 8. Струм секції ВРД при  $U_n$  та  $0,3 \cdot M_n$



2.08 2.1 2.12 2.14

$t, c$   
Рис. 10. Струм секції при зміні моменту навантаження

Двигун досягає частоти обертання – 50 об/хв. Амплітудне значення струму менше у порівнянні з попереднім експериментом, що відповідає зміні навантаження.

Як видно з осцилограм струму секцій ВРД (рис. 7, рис. 8), нечіткий регулятор для непрямого визначення положення ротора ВРД забезпечує роботу двигуна у квазіусталеному режимі роботи.

Мала зміна частоти обертання під час зміни моменту навантаження зумовлена конструкцією та типом двигуна (моментний двигун).

Дослідження перехідних режимів роботи проведено, змінюючи момент навантаження та напругу живлення. На рис. 9 представлено осцилограму зміни струму секції ВРД при різкому зменшенні напруги живлення (на 40 %) відносно номінальної з навантаженням  $0,5 \cdot M_n$ . При цьому частота обертання знизилась на 24 % відносно початкового значення.

На рис.10 представлена осцилограма зміни струму секції при різкому зменшенні моменту навантаження (на 45 %) відносно початкового. При цьому частота обертання ротора зросла на 20 %. Амплітудне значення струмів секції змінне, що пояснюється нестабільністю навантаження типу сухе тертя.

**Аналіз отриманих результатів дає змогу зробити такі висновки:**

В описаній вище експериментальній установці навантаження створюється методом сухого тертя, що характеризується нестабільністю та вносить додаткові похибки. Проте структура та елементна база експериментальної установки дає змогу проводити дослідження різних бездавачевих систем керування та досліджувати роботу ВРД з різними системами керування.

Алгоритм визначення початкового положення ротора дозволяє з достатньою точністю обчислити початкове положення ротора незалежно від напруги живлення та початкового кута і здійснити пуск двигуна без стартового коливання ротора.

Фаззі-регулятор для непрямого визначення положення ротора забезпечує роботу ВРД у квазіусталених та перехідних режимах роботи при зміні напруги живлення та моменту навантаження. Він придатний для роботи з двигунами на низьких та середніх швидкостях. Хоча це обмеження можна не враховувати, зважаючи на можливість використання спеціальних мікроконтролерів для роботи з нечіткою логікою.

Список використаної літератури

1. Лозинський А.О. Визначення початкового положення ротора в бездавачевий системі керування ВРД / А.О. Лозинський, Т.І. Михайлович // Праці конф., Автоматика-2010. –Харків: – Т.1. – Харківський нац. ун-т радіоелектроніки. – 2010. – С. 248–249.

2. Лозинський А. О. Спрощення структури нечіткого регулятора для керування ВРД / А.О.Лозинський, Т.І.Михайлович. — Харьков: / Вестник Нац. технич.ун-та «ХПИ». – 2009. – С. 564-565.

3. Лозинський А. О. Фаззі-керування ВРД без давача положення ротора / А. О. Лозинський, Т. І. Михайлович. // Тематич. вип. журналу «Електроінформ». – Львів: – 2009. – С. 432-434.

4. Лозинський А. О Синтез нечіткого регулятора для керування ВРД без давача положення ротора / А.О Лозинський Т. І. Михайлович. Матеріали конф., Автоматика 2011. // Відп.ред.М.Д.Кіселичник – Львів: Видавн. Львівської політехніки. – 2011. – С. 146–147.

5. Ткачук В. Електромеханотроніка: Навчальний посібник / В.Ткачук – Львів: Видавн. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, – 2001. – 404 с.

6. Chau K.T., Chan C.C., Chunhua Liu. Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles / IEEE Transactions on industrial electronics. – Vol. 55. – No. 6. – June 2008 – P. 2246-2257.

7. Husain I. Rotor position sensing in switched reluctance motor drives by measuring mutually induced voltages / IEEE Transaction on industry applications. – Vol.30. – No.3.– May/June 1994. – P. 665-672.

8. Nesimi Ertugrul, Adrian D. Cheok. Indirect Angle Estimation in Switched Reluctance Motor Drives Using Fuzzy Logic Based Motor Model / IEEE transactions on power electronics. – Vol.15. – No. 6. –November 2000. – P. 1029-1044.

of the SRM / Proc of Int. Conf. Automatics–2010. – Kharkiv: Kharkiv National University of Radioelectronics. – V1–2010. – Pp. 248–249 [in Ukrainian].

2. Lozynskyy A.O., Mykhailovych T.I. Fuzzy-controller’s structure simplification for control of the switched reluctance motor / Bulletin of the National Technical University "HTI". – Kharkiv: – 2010. – Pp.564–565 [in Ukrainian].

3. Lozynskyy A.O., Mykhailovych T. Fuzzy-control of switched reluctance motor without position sensor // Special issue "Electroinform". – Lviv: – 2009. — Pp.432–434 [in Ukrainian].

4. Lozynskyy A.O., Mykhailovych T. Fuzzy -controller synthesis for the control of sensorless SRM drive // Lviv: Proc of Int. Conf. Automatics–2011. Polytechnic National University. – Lviv: –2011.– P.146–147 [in Ukrainian].

5. Tkachuk V. Elektromehanotronika –Lviv Polytechnic Publishing House. – Lviv: – 2001.– 404 p. [in Ukrainian].

6. Chau K.T., Chan C.C, Chunhua Liu. Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles // IEEE Transactions on industrial electronics.– Vol. 55.– No.6, June 2008.– Pp. 2246–2257 [in English].

7. Husain I., Ehsani M. Rotor position sensing in switched reluctance motor drives by measuring mutually induced voltages // IEEE Transaction on industry applications. – Vol.30. – No.3, May/June 1994. – P. 665–672 [in English].

8. Nesimi Ertugrul, Adrian D. Cheok. Indirect Angle Estimation in Switched Reluctance Motor Drives Using Fuzzy Logic Based Motor Model. // IEEE transactions on power electronics. – Vol.15. – No.6, November 2000.– P. 1029–1044 [in English].

Отримано 25.10.2011

References

1. Lozynskyy A.O., Mykhailovych T. Rotor position estimation in sensorless control system



Михайлович  
Тарас Ігорович,  
аспірант каф. ел.машин та  
апаратів нац.ун-ту  
«Львівська політехніка»,  
тел.: +38 096 749 52 20