

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

**Бобечко Юрій Остапович**



УДК 621.313.13

**СИНТЕЗ ТА АНАЛІЗ НЕЙРОКОНТРОЛЕРА СИСТЕМИ  
КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЬНИМ РЕАКТИВНИМ ДВИГУНОМ**

05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
**Лозинський Андрій Орестович**, директор  
Інституту енергетики та систем керування  
Національного університету «Львівська політехніка»

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор  
**Римша Віталій Вікторович**, професор кафедри  
електричних машин Одеського національного  
політехнічного університету

доктор технічних наук, професор  
**Орловський Ігор Анатолійович**, професор кафедри  
електропривода та автоматизації промислових установок  
Запорізького національного технічного університету

Захист відбудеться \_\_\_\_\_ 2015 р. о \_\_\_\_\_ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 114 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий « \_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради, к.т.н., доцент



В. І. Коруд

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Вентильні та реактивні двигуни (ВРД) набули широкого застосування в різних галузях техніки завдяки високим енергетичним і техніко-економічним характеристикам.

Останнім часом відбувається новий етап розвитку приводів з вентильними двигунами, який характеризується спрощенням апаратної структури приводу за рахунок ускладнення програмної. Все більшого поширення набувають дослідження, спрямовані на створення ефективних алгоритмів управління ВРД. У таких системах за допомогою математичного апарату створюють естиматор, який за непрямыми параметрами зможе оцінити положення ротора, і на основі цієї інформації здійснюють комутації. Більшість наявних методів для визначення положення ротора використовують миттєве значення індуктивності або зміну потокозчеплення та базуються на складних математичних моделях, що створює проблеми при фізичній реалізації таких систем: вимагає використання додаткового апаратного забезпечення для опрацювання сигналів, робить систему чутливою до параметричних збурень та обмеженою в діапазоні швидкостей.

Уникнути застосування складних математичних моделей для ідентифікації положення ротора і формування необхідних характеристик електромеханічного перетворювача дозволяють інтелектуальні підходи на основі штучних нейронних мереж та фаззи-логіки.

Роботи багатьох учених, зокрема I. Husaina, E. Mese, A. D. Cheoka, щодо використання нейронних мереж у системах керування ключами електронного комутатора електромеханічного перетворювача, характеризуються застосуванням громіздких структур нейронної мережі та використанням величини потокозчеплення. Окрім цього, при використанні вже існуючих систем керування на базі нейронних мереж ВРД працює тільки на природній механічній характеристиці. Враховуючи те, що в сучасних системах потрібне регулювання швидкості обертання ВРД, поряд з наявною системою визначення положення ротора необхідним є створення ще одного додаткового регулятора. Це призведе до подальшого ускладнення системи і зменшить привабливість такого підходу з точки зору фізичної реалізації.

Таким чином, створення бездавачевої системи на основі принципів теорії нейронних мереж, яка забезпечить необхідну ідентифікацію положення ротора у квазіусталених та перехідних режимах роботи при різних напругах живлення, є актуальною науковою задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження проводилися на кафедрі електричних машин і апаратів відповідно до наукового напрямку Інституту енергетики та систем керування Національного університету «Львівська політехніка» «Ресурсозберігаючі технології та інтелектуальні системи керування в енергозабезпеченні об'єктів економічної діяльності», рекомендованого вченою радою університету та розробленого згідно з Законом України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки та техніки» від 11.07.2001 р. та відповідно до Закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» в редакції від 09.09.2010 р.

Проведені дослідження виконувалися за участю автора в науково-дослідних держбюджетних роботах Міністерства освіти і науки України «Розроблення мехатронних та електромеханічних вузлів легкових транспортних засобів» (номер державної реєстрації 0110U001107), «Оптимальне багатокритеріальне керування динамічними процесами технологічних об'єктів на основі теорії нечітких множин» (номер державної реєстрації 0111U001230).

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є синтез бездавачевої системи ідентифікації положення ротора та керування ВРД на основі теорії штучних нейронних мереж, а також аналіз роботи ВРД з нейроконтролером.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- провести аналіз різних типів штучних нейронних мереж, які традиційно застосовуються в електромеханічних системах, для вибору типу мережі, яка буде використовуватися в бездавачевій системі керування;
- синтезувати різні структури нейроестиматора кута положення ротора та нейроконтролера і дослідити поведінку ВРД в різних режимах роботи;
- створити математичну модель для дослідження ВРД з бездавачевою системою керування;
- створити експериментальну установку та перевірити запропоновані рішення.

**Об'єктом дослідження** є електромеханічні та електромагнітні процеси у вентильному реактивному двигуні з бездавачевою системою керування, побудованою на основі теорії штучних нейронних мереж.

**Предметом дослідження** є структурний та параметричний синтез нейроестиматора положення ротора та нейроконтролера вентильного реактивного двигуна.

**Методи досліджень.** При вирішенні поставлених в дисертації задач використовувалися методи теорії штучних нейронних мереж (для структурно-параметричного синтезу нейроестиматорів та нейроконтролерів), теорії математичного моделювання (для створення моделей силових кіл досліджуваних об'єктів) та проведено експериментальні дослідження для підтвердження адекватності використаних математичних моделей та прийнятих рішень.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

- отримала подальший розвиток теорія нейрокерування електромеханічними перетворювачами щодо вибору структури і функцій активації нейронів, що дало змогу синтезувати нейроконтролер та нейроестиматор бездавачевої системи керування ВРД, який дозволяє отримати необхідну точність ідентифікації кута положення ротора/сигналів ключів керування;
- вперше на основі штучної нейронної мережі Кохонена та використання алгоритму «переможець забирає все» синтезовано нейроконтролер бездавачевої системи керування ВРД, який забезпечує класифікацію сектора розміщення положення ротора і формування сигналів керування на ключі комутатора;
- вперше на основі штучної нейронної мережі прямого поширення сигналу синтезовано нейроконтролер бездавачевої системи керування, який забезпечує можливість формування жорстких механічних характеристик ВРД шляхом регу-

лювання величин кутів вмикання та комутації секції, тобто виконує функцію нейроестиматора кута положення ротора і нейрорегулятора.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

- синтезовані системи ідентифікації положення ротора і керування ВРД на основі нейронних мереж, які дозволяють уникнути використання датчика положення ротора (ДПР) та формувати жорсткі механічні характеристики, можуть бути використані в неprecizійних електроприводах;
- розроблено програми для дослідження ВРД без датчика положення ротора (ДПР) з різними структурами нейронних мереж;
- надано рекомендації щодо вибору структури нейроестиматора та нейроконтролера бездатчової системи керування ВРД;
- створено експериментальну установку, яку можна використовувати для подальшого дослідження бездатчових систем керування ВРД.

Результати роботи також використовуються в навчальному процесі у навчальному курсі «Інтелектуальне керування в електромеханічних системах», а створена експериментальна установка буде використана в лабораторному практикумі дисципліни «Основи мехатроніки» бакалаврського напрямку 6.050702 «Електромеханіка».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення, результати та розробки, які виносяться на захист, отримані автором. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: [1] – вибір структури і активаційних функцій штучної нейронної мережі прямого поширення сигналу та результати комп'ютерного симулювання роботи бездатчової системи керування з використанням синтезованого нейроестиматора; [2] – вибір архітектури нейронної мережі для формування жорстких механічних характеристик ВРД та результати досліджень на математичній моделі; [3] – вибір структури нейроконтролера на основі мережі Кохонена та результати дослідження його роботи методом комп'ютерного симулювання.

**Апробація роботи.** Основні положення дисертаційної роботи та результати досліджень доповідалися та обговорювалися на 10-й Міжнародній науковій конференції «Нейросетевые технологии и их применение НСТиП – 2011» (Краматорськ, 7–9 грудня 2011 р.), 12-й Міжнародній науково-технічній конференції «Проблемы современной электротехники – 2012» (Вінниця, 4–8 червня 2012 р.), 19-й Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми автоматизованого електропривода» (с. Миколаївка, Крим, 17–22 вересня 2012 р.), наукових семінарах кафедри «Електричні машини і апарати» Національного університету «Львівська політехніка» у 2010–2014 рр.

**Публікації.** За результатами виконаних у дисертаційній роботі досліджень опубліковано п'ять статей у фахових наукових виданнях України, з них одна в журналі, який входить у наукометричну базу даних Scopus.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 134 найменувань на 17 сторінках та 4 додатків. Повний обсяг роботи становить 173 сторінки, серед яких 140 сторінок основної частини, 78 рисунків і 6 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, її зв'язок із науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета та задачі досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, викладено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, наведено дані про реалізацію результатів роботи, її апробацію та публікації.

У першому розділі наведено короткий огляд областей застосування вентильних реактивних двигунів та їхніх конструктивних особливостей, розглянуто ДПР як окремий елемент ВРД, зазначені основні переваги та недоліки ВРД і традиційної системи керування із застосуванням ДПР. Проведено аналітичний огляд робіт, присвячених методам непрямого визначення положення ротора, які поділені на дві групи: активні та пасивні.

Активні методи, що ґрунтуються на подачі низькоамплітудного високочастотного сигналу в неактивну фазу, характеризуються необхідністю використання генератора високочастотних сигналів і опитування всіх фаз двигуна. Недоліком використання діагностувальних імпульсів є те, що вони можуть зумовити негативний електромагнітний момент, а також обмежують максимальну робочу швидкість двигуна через те, що потрібний великий період паузи між моментами подавання тестуючих сигналів. Методи, які дозволяють уникнути створення негативного моменту, не забезпечують високу швидкодію і потребують додаткового генерування імпульсів. Отже, активні методи визначення положення ротора ВРД, придатні для роботи при низьких та середніх швидкостях, не вимагають додаткової процедури пуску.

Пасивні методи, в яких інформація про положення ротора отримується через вимірювання величин напруги, струму та взаємоіндукованої напруги на клемних затискачах двигуна і подальше їх опрацювання, мають ряд недоліків, які полягають в обмеженому діапазоні робочих швидкостей і недопустимості різких змін навантаження або в необхідності значної кількості обчислень у реальному часі, знання параметрів навантаження і точної моделі двигуна. Окрім того, зміна опору через нагрівання може призвести до неправильного визначення потокозчеплення, величина якого використовується в частині пасивних методів.

Згадані недоліки класичних підходів визначення положення ротора ВРД стали причиною пошуку нових підходів до створення бездавачевих систем керування ВРД з використанням методів інтелектуального керування, зокрема штучних нейронних мереж. Використання нейронних мереж, фаззи-логіки, а також їх поєднання дозволяють створити систему, яка не залежить від первинних даних двигуна та є стійкою до різноманітних завад, поєднати переваги активних і пасивних методів визначення положення ротора. На даний час потенціал інтелектуальних підходів не реалізований у повній мірі: нейронні мережі характеризуються складністю структури або використанням величини потокозчеплення, а фаззи-системи – громіздкістю баз правил.

Виходячи з проведеного огляду доступних джерел можна стверджувати, що застосування штучних нейронних мереж у бездавачевих системах керування ВРД вимагає розв'язання чисто теоретичних та методологічних задач, пов'язаних із:

вибором типу нейронної мережі, структури нейромережі та виду активаційних функцій нейронів для ідентифікації кута положення ротора при синтезі нейроестиматора чи додаткових параметрів, необхідних для регулювання, у випадку синтезу нейроконтролера; формуванням навчальної бази даних; оптимізацією системи для отримання якомога кращого балансу між мінімізацією кількості даних та обчислень, що забезпечує підвищення швидкодії, з одного боку, та належною точністю ідентифікації кута положення ротора ВРД в різних режимах роботи з іншого боку; виробленням рекомендацій для створення універсальних нейроестиматорів та нейроконтролерів для можливості роботи з різними типами ВРД; простотою реалізації, яка включає в себе вимірювання клемних величин та використання мінімуму апаратних та інформаційних ресурсів.

**У другому розділі** розглянуто проблематику синтезу нейронної мережі, наведено основні рекомендації щодо вибору структури штучної нейронної мережі, активаційних функцій нейронів і методу навчання, формування навчальних даних. Описано синтез нейроестиматорів та нейроконтролерів для бездавачевої системи керування ВРД.

Для формування навчальної бази даних та в подальшому за основу для моделювання роботи ВРД із синтезованими бездавачевими системами керування використано математичну модель ВРД, яка входить в автоматизовану систему дослідження ВРД, розроблену на кафедрі ЕМА НУ «Львівська політехніка» під керівництвом проф. Ткачука В. І. Адекватність цієї моделі підтверджена співпадінням результатів математичного моделювання та фізичного експерименту.

Дослідження проводилися для шестисекційного ВРД U-подібної конструкції 24/22 при таких даних: напруга живлення – 60 В; корисна потужність – 271 Вт; частота обертання – 330 об/хв; коефіцієнт корисної дії – 74 %; момент навантаження – 4,32 Нм.

В абсолютній більшості існуючих систем керування ВРД та основі ШНМ тим чи іншим чином використовують інформацію про індуктивність фаз/потокозчеплення для визначення положення ротора. Рівняння потокозчеплення фази обмотки якоря електромеханічного перетворювача (ЕМП) з пасивним ротором, відповідно до використаної моделі, має вигляд:

$$\psi(\theta, i) = (\psi_{10} - \psi_{1t} \cdot \sin(\theta/2)) \cdot i + \psi_y \cdot \sin(\theta/2) \cdot (1 - e^{-a \cdot i \cdot \sin(\theta/2)}), \quad (1)$$

де  $\theta$  – електричний кут між віссю паза ротора і зубця статора;  $i$  – струм збудження фази;  $\psi_{10}, \psi_{1t}, \psi_y, a$  – коефіцієнти, які є постійними для конкретного двигуна.

Продиференціювавши це рівняння як функцію двох змінних та врахувавши рівняння напруги (2), прикладеної до секції ВРД в узагальненій формі, а саме:

$$R \cdot i + \frac{d\psi}{dt} = U_m, \quad (2)$$

отримаємо залежність (3), у якій похідна потокозчеплення залежить лише від струму, похідної струму та напруги живлення.

$$\frac{d\theta}{dt} = \left( U_m - A \cdot \frac{di}{dt} \right) \cdot \frac{1}{B}, \quad (3)$$

де

$$A = \frac{d\psi}{di} = \psi_{10} - \psi_{1t} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \psi_y \cdot a \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot e^{-a \cdot i \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)};$$

$$B = \frac{d\psi}{d\theta} = \frac{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2} \cdot (\psi_y - \psi_{1t} \cdot i - \psi_e \cdot e^{-a \cdot i \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}) \cdot (1 - a \cdot i \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)).$$

Отже, до навчальної бази даних нейронних мереж необхідно включити величини струмів секції, похідних струмів, напруги живлення, кута положення ротора, а також сигналів на ключах керування, зняті при різних кутах вмикання секції та інтервалах комутації, моментах навантаження та напругах живлення.

Виходячи з результатів аналізу застосування нейронних мереж в електромеханічних системах та здатності до апроксимації функцій, першим типом мережі для синтезу нейроестиматора вибрано мережу прямого поширення сигналу. Входами такої мережі на основі вищевикладеного матеріалу вибрані струми фаз, похідні струмів та напруга живлення, вихідною величиною – кут положення ротора. При дослідженні у прихованому шарі використовувалися нейрони з активаційними функціями виду гіперболічний тангенс. У вхідному і вихідному шарах – лінійні функції активації.

Перед навчанням дані було поділено на три категорії: тренувальні, для кросс-перевірки і тестування. Також для покращення якості навчання рядки даних були рандомно перемішані, а величини нормалізовано.

Для вибору кількості нейронів прихованого шару було навчено і протестовано мережі з кількістю нейронів від 2 до 41. Показником точності навченої мережі служить мінімальний середній квадрат похибки (MSE) із середніх квадратів помилок для різних епох навчання. У результаті отримано структуру з вісьмома нейронами в прихованому шарі (рис. 1 а).

Тестування навченої нейронної мережі проведено на даних, які не використовувалися при навчанні. На рис. 1 б показано результат тестування при напрузі живлення, яка дорівнює 0,7Ун та моменті навантаження – 0,9Мн. При цьому середня абсолютна похибка MAE = 6,263448 ел. град.; коефіцієнт кореляції  $r = 0,987552$ ; нормований середній квадрат похибки NMSE = 0,024878. А отже, мережа достатньо добре навчена.

Щоб спростити структуру мережі, було проведено аналіз «чутливості», який дозволяє визначити відносну важливість входів нейронної мережі шляхом порівняння помилок прогнозування вихідної нейромережі з помилками прогнозування навчених на цих же даних інших нейромереж, отриманих з вихідної шляхом видалення по одному кожного із вхідних нейронів. Результати аналізу показали, що для визначення положення ротора ВРД більш важливими є величини струмів фаз.



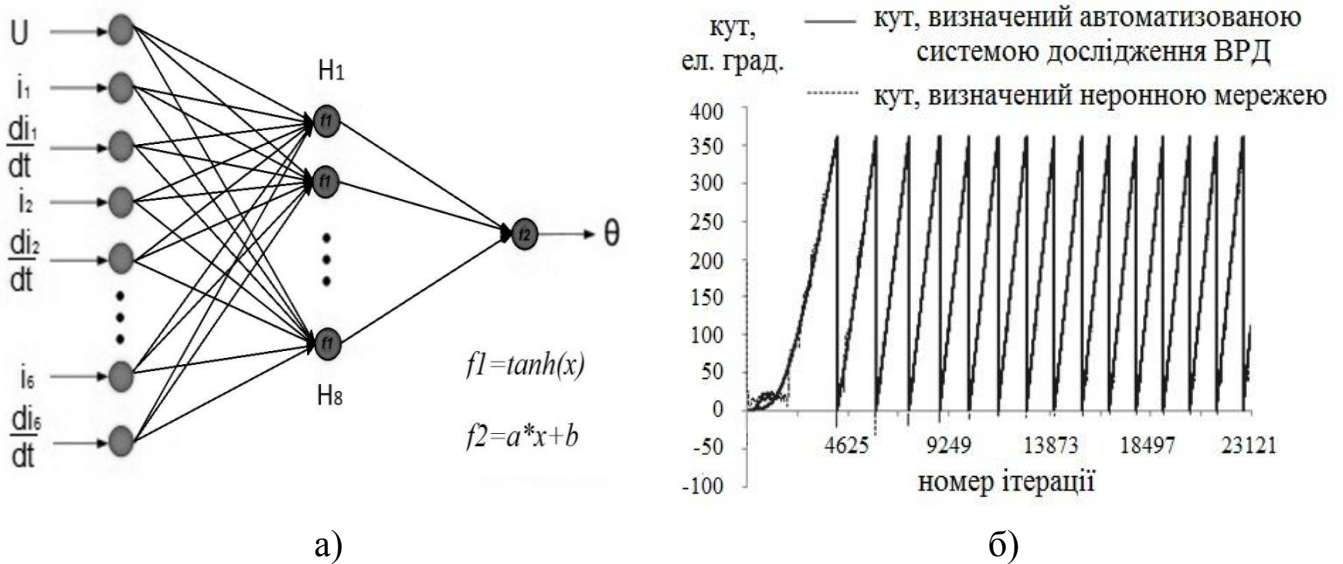


Рис. 1. а – архітектура нейронної мережі прямого поширення сигналу виду 13-8-1; б – кут положення ротора, визначений автоматизованою системою дослідження ВРД та нейронною мережею

Тому було запропоновано синтезувати нейронну мережу, вхідними величинами якої будуть лише струми фаз, а вихідною – кут положення ротора. Архітектура такої мережі зображена на рис. 2. У результаті синтезу в прихованому шарі 10 нейронів. При тестуванні описаної мережі  $MAE = 7,124893$  ел. град.;  $r = 0,984895$ ;  $NMSE = 0,030591$ .

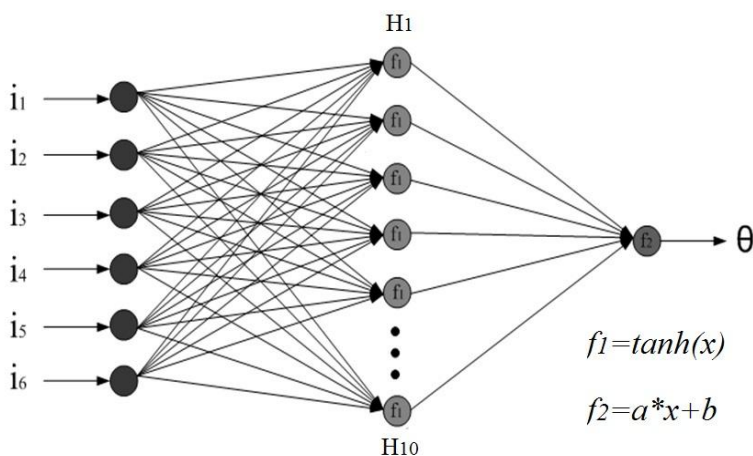


Рис. 2. Архітектура нейронної мережі прямого поширення сигналу виду 6-10-1

що вихідне значення кута положення ротора є додатковим входом нейронної мережі з затримкою в один такт. Результати тестування навченої рекурентної мережі ( $MAE = 24,802438$  ел. град.;  $r = 0,932034$ ;  $NMSE = 0,133881$ ) демонструють погіршення роботи при переході з  $360^{\circ}$  до  $0^{\circ}$ , що трактується нейромережею як система з перемиканням і розривом похідної вихідної величини. Для розривних функцій у загальному випадку відповідно до рекомендацій Хехт-Нільсена доцільним є використання штучних нейронних мереж з двома прихованими шарами, і тому подальший пошук оптимального нейроконтролера на основі рекурентної нейромережі не виконувався.

Порівнюючи результати тестування можна стверджувати, що мережа виду 6-10-1, на відміну від рекурентної, не значно поступається мережі 13-8-1.

Оскільки в результаті роботи системи керування ВРД визначаються сигнали ключів керування, то створено нейронну мережу, яка може безпосередньо визначати ці сигнали. Для розв'язання поставленої задачі запропоновано використовувати самоорганізуючу карту Кохонена, вихідні величини якої є входами для мережі прямого поширення сигналу. Карта Кохонена класифікує вхідні приклади на групи подібних, а мережа прямого поширення сигналу перетворює уже класифіковані вхідні дані у сигнали, які подаються на ключі керування ВРД.

Після проведення аналізу «чутливості» нейромережі до вхідних сигналів вхідними даними вибрані струми фаз і напруга мережі. В шарі Кохонена 24 нейрони. Для даного типу мереж характерне використання активаційної функції Гауса або алгоритму на основі парадигми «переможець отримує все». Відповідно було синтезовано дві нейромережі, які успішно справляються з формуванням сигналів на вмикання/вимикання ключів керування. Однак при співмірній точності відтворення мережа, в якій для нейронів шару Кохонена використана стратегія «переможець забирає все», вимагає значно менше обчислень і має простішу структуру: прихованого шару мережі прямого поширення сигналу в даному випадку немає, тому що виходами шару Кохонена є лише нулі та одиниці. Архітектура такої нейронної мережі показана на рис. 3 а, а результати тестування на рис. 3 б (середні похибки для 6-ти ключів: MAE = 0,119118 ел. град.;  $r = 0,896221$ ; NMSE = 0,207427).

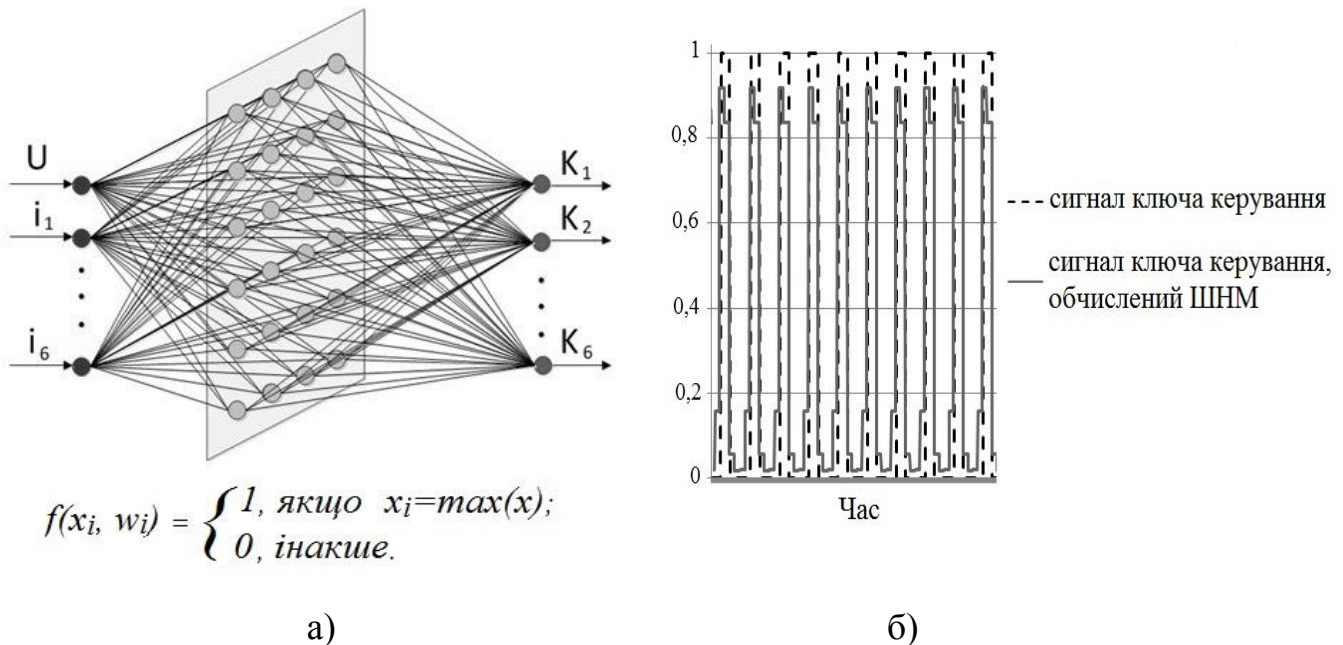


Рис. 3. а – архітектура нейронної мережі на основі самоорганізуючої карти Кохонена з активаційною функцією «переможець забирає все»; б – типовий вигляд сигналу ключа керування, обчисленого штучною нейронною мережею

Для багатьох систем є актуальним формування жорстких характеристик у широкому діапазоні зміни навантаження. Один з методів формування таких характеристик – застосування широтно-фазового керування ВРД. Ширина імпульсу керування визначається величинами кутів вмикання секції  $\beta$  та інтервалу комутації  $\gamma$ .

Було проаналізовано залежності швидкості обертання та коефіцієнта корисної дії від параметрів комутації при різних моментах навантаження (0.5, 0.6, ... 1.5 Мн) і напругах живлення (0.33, 0.67, ... 1.67 U<sub>н</sub>). Кути вмикання змінювалися в діапазоні 0, 10, ... 50 ел. град.; інтервали комутації – в діапазоні 60, 70, ... 160 ел. град., при цьому  $\beta + \gamma < 165$  ел. град. Швидкість обертання завжди спадає при зменшенні кута комутації і збільшенні кута вмикання секції, але регулювання швидкості обертання зміною кута вмикання спричинює значне зниження ККД (на 10–15 %) і підвищує пульсації електромагнітного моменту.

Для кожної напруги живлення визначено кути вмикання і комутації, що забезпечували приблизно однакову частоту обертання, яку можна підтримувати у вказаному діапазоні зміни моменту навантаження. При цьому регулювання величиною кута вмикання застосовувалося тільки тоді, коли не вистачало діапазону регулювання величиною кута комутації.

У результаті виконаних досліджень, отримано навчальну базу даних, у яку входять фазні струми, кут положення ротора, кути вмикання та комутації секції.

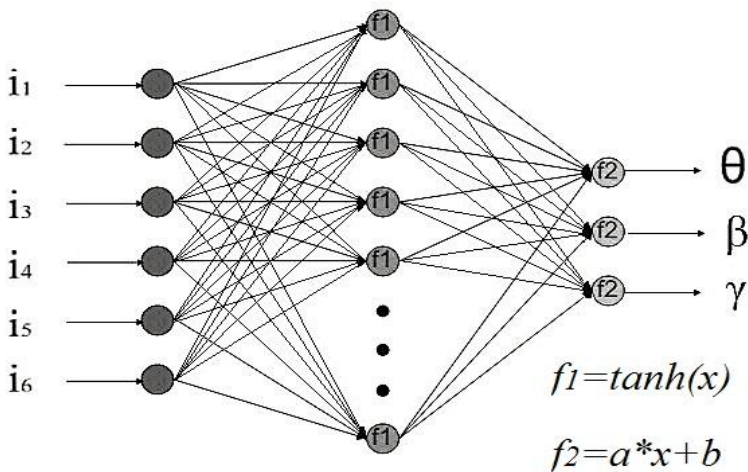


Рис. 4. Архітектура нейронної мережі прямого поширення сигналу виду 6-10-3

Архітектуру мережі вибрано аналогічно до попередніх мереж прямого поширення сигналу (рис. 4). У результаті синтезу в прихованому шарі отримано 10 нейронів.

При тестуванні середня абсолютна похибка визначення кута положення ротора для описаної мережі MAE = 15,985 ел. град.; коефіцієнт кореляції  $r = 0,977532$ ; нормований середній квадрат похибки NMSE = 0,047772. Для кутів вмикання і комутації MAE = 5.843887 і 7,422115 ел. град. відповідно.

Отже, запропонована структура штучної нейронної мережі виду 6-10-3 забезпечує одночасне вирішення задачі ідентифікації кута положення ротора та параметрів комутації секції, проте дещо програє штучній нейронній мережі для окремого визначення кута положення ротора.

**У третьому розділі** на математичній моделі проаналізовано поведінку ВРД з нейроестиматором кута положення ротора, нейроконтролером на основі карти Кохонена і нейроконтролером для формування жорстких механічних характеристик.

Для дослідження бездавачевих систем керування модель силової частини ВРД з буферами енергії, яка входить в автоматизовану систему дослідження ВРД, у вигляді окремих програмних модулів було доповнено відповідними моделями, які реалізують нейронні мережі.

Попередні дослідження роботи бездавачевої системи керування ВРД з використанням нейроконтролера (нейроестиматора) на основі мережі прямого по-

ширення сигналу продемонстрували, що зменшення вектора вхідних величин нейромережі, яке дозволило уникнути додаткових вимірювань і обчислень поточозчеплень, призводить до появи окремих точок зі значними відхиленнями значень кута положення ротора від реального, що, у свою чергу, може спричинити некоректну комутацію фаз. Тому для покращення точності отриманих результатів запропоновано використовувати математичну обробку вихідної величини нейромережі – ядерне згладжування з ядром Гауса. Математичний апарат згладжування реалізований у вигляді окремої підпрограми, вхідні величини якої корегуються і далі передаються в систему керування ВРД.

Для перевірки працездатності запропоновані системи непрямого визначення положення ротора на основі нейромережевих підходів досліджено методом комп'ютерного симулювання у квазіусталеному режимі, а також при змінах навантаження і напруги живлення.

На рис. 5 та 6 наведено порівняльні графіки частоти обертання ВРД, електромагнітного моменту та струму фази при застосуванні в системі керування давача положення ротора, нейроестиматора кута положення ротора на основі мережі прямого поширення сигналу виду 6-10-1 та нейроконтролера керування ключами комутатора на основі мережі із самоорганізуючою картою Кохонена і навчальною парадигмою «переможець забирає все».

Нейроестиматор на основі мережі прямого поширення сигналу виду 6-10-1 забезпечує необхідну точність визначення кута положення ротора ВРД при зміні напруги живлення від 0,4 до 1,4Ун та зміні моменту навантаження від 0,2 до 1,6Мн. При цьому швидкість обертання ротора в системі з нейроестиматором відрізняється від швидкості у традиційній системі не більше, ніж на 6 %.

Нейроконтролер для формування сигналів на ключах керування на основі самоорганізуючої карти Кохонена показав дещо гіршу точність і при менших діапазонах зміни моменту навантаження та напруги живлення, ніж нейроестиматор на основі мережі прямого поширення сигналу виду 6-10-1. Проте активаційна функція тангенс гіперболічний та сама мережа прямого поширення сигналу потребує більше обчислювальних затрат порівняно з нейроконтролером на основі карти Кохонена, особливо при використанні вихідного вектора шару Кохонена та відповідної йому таблиці комутації ключів, що може стати вагомою перевагою при апаратній реалізації бездавачевої системи керування ВРД.

Коефіцієнт пульсації електромагнітного моменту зростає до 16–19 % при використанні нейроестиматора на основі мережі прямого поширення сигналу виду 6-10-1 і до 21–37 % при використанні нейроконтролера на основі карти Кохонена з парадигмою навчання «переможець забирає все» у порівнянні з традиційною системою керування з давачем положення ротора, де коефіцієнт пульсації знаходиться в межах 15–18 %.

Різниця в амплітудах, середніх значеннях та формах струмів пояснюється тим, що навіть незначні неточності при переключенні ключів керування спричинюють помітний вплив на струми через складні комутаційні взаємодії. При використанні нейроестиматора кута положення ротора середні значення струму більші максимум на 5 %, а при використанні нейроконтролера для формування керуючих впливів на ключі керування – на 11–17 %, ніж у давачевій системі.



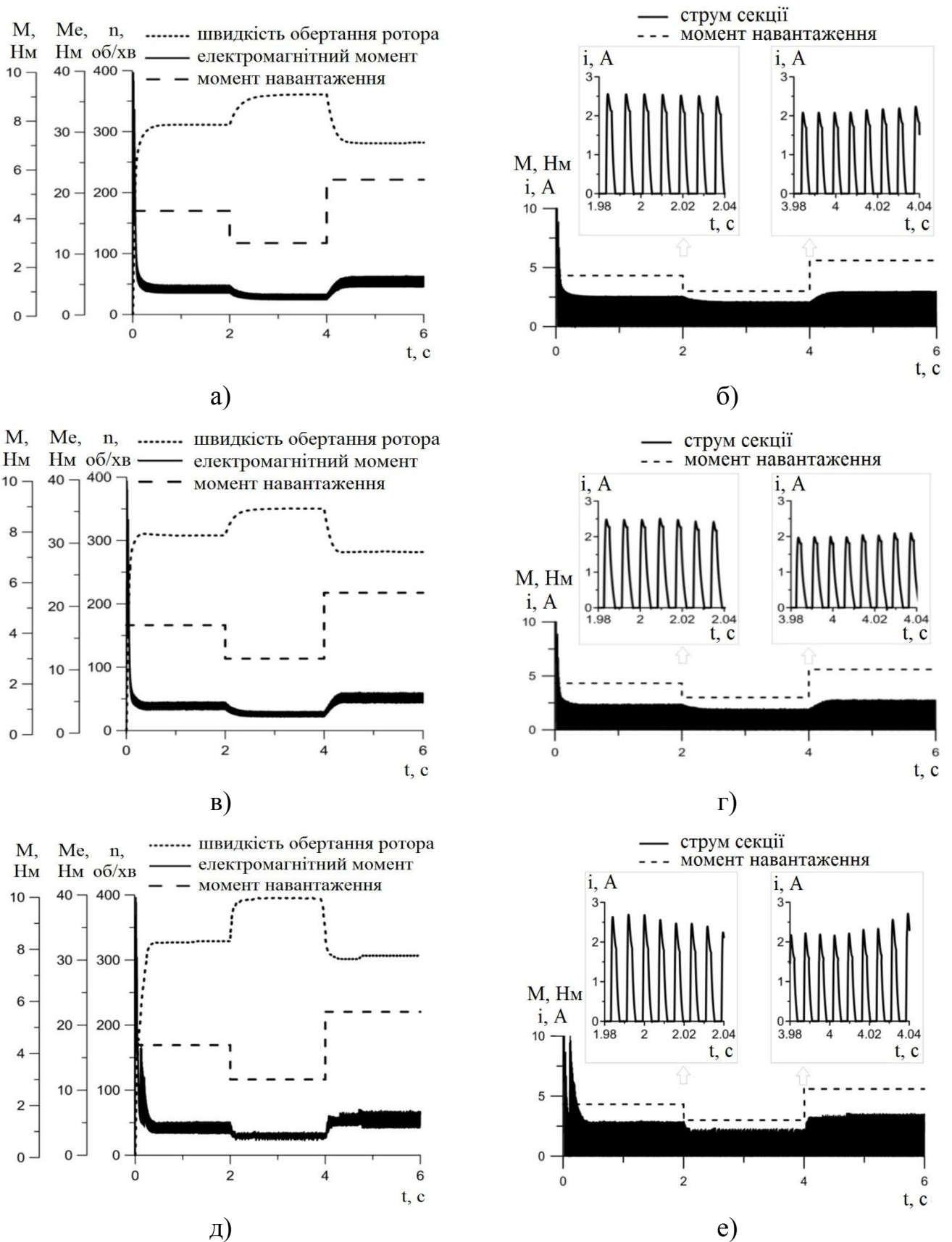
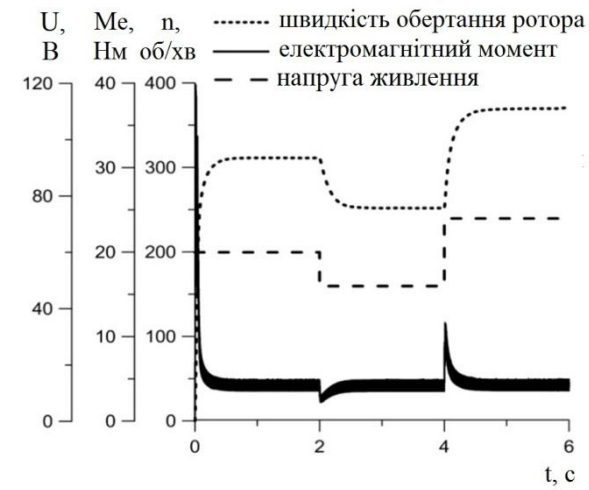
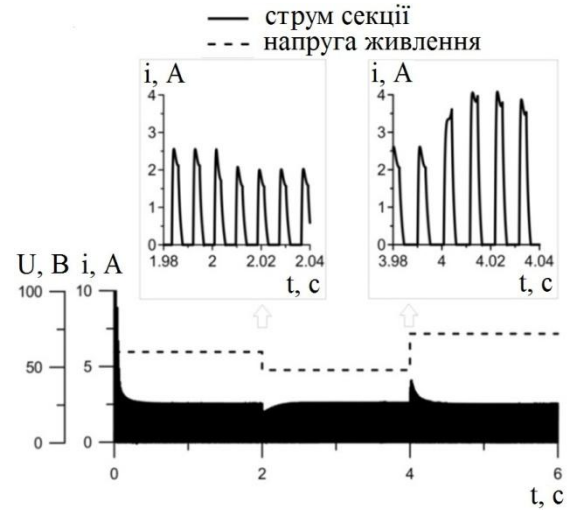


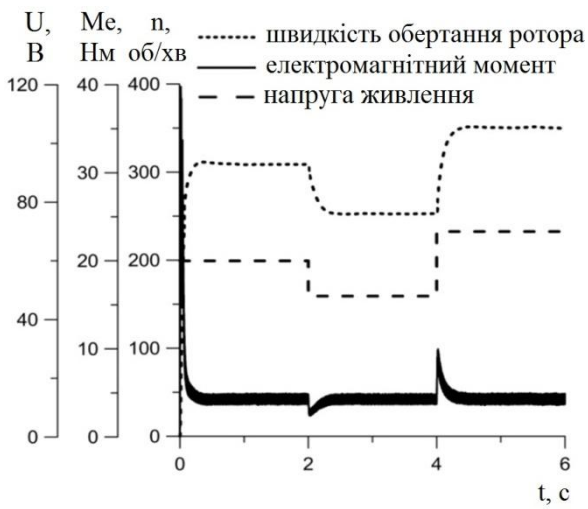
Рис. 5. Швидкість обертання, електромагнітний момент та струм фази ВРД при номінальній напрузі живлення і змінах моменту навантаження, коли для ідентифікації кута положення ротора використовується: а, б – ДПР; в, г – нейронна мережа виду 6-10-1; д, е – нейронна мережа на основі карти Кохонена з навчальною парадигмою «переможець забирає все»



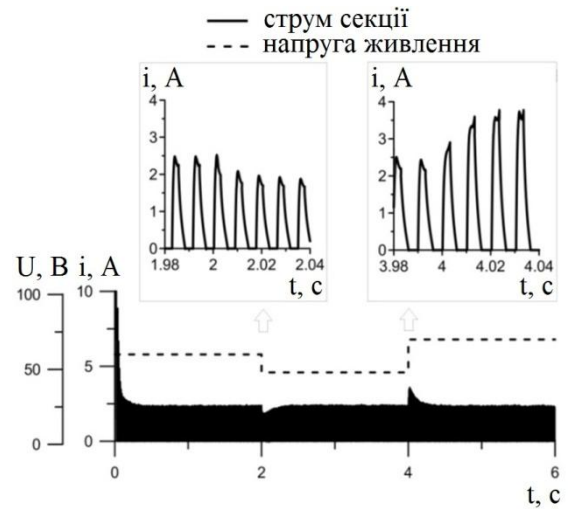
а)



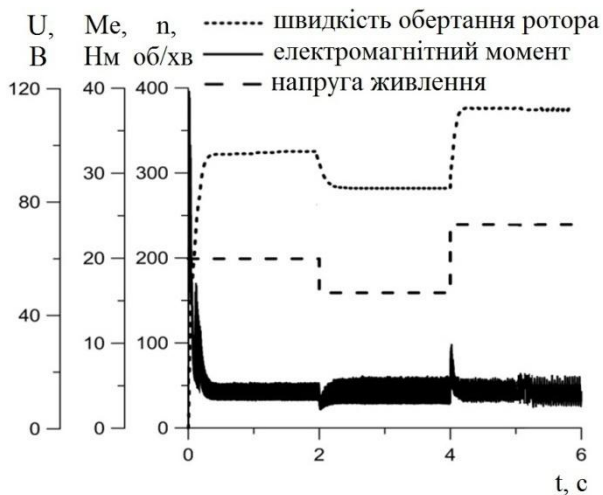
б)



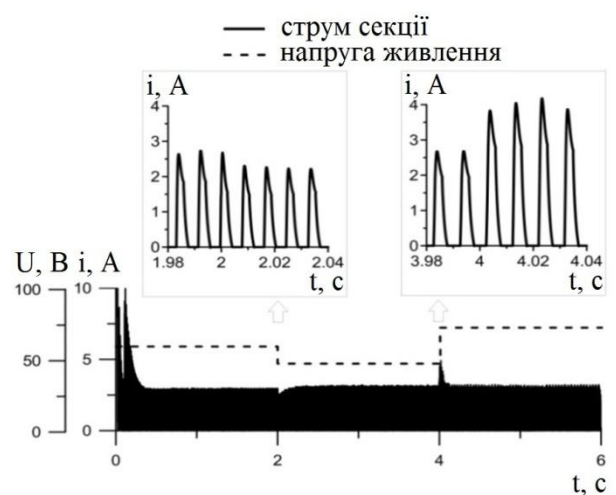
в)



г)



д)



е)

Рис. 6. Швидкість обертання, електромагнітний момент та струм фази ВРД при номінальному моменті навантаження і змінах напруги живлення, коли для ідентифікації кута положення ротора використовується: а, б – ДПР; в, г – нейронна мережа виду 6-10-1; д, е – нейронна мережа на основі карти Кохонена з навчальною парадигмою «переможець забирає все»

На рис. 7 показано залежності зміни швидкості та електромагнітного моменту, а на рис. 8 – роботу системи нейрокерування щодо визначення кутів вмикання та комутації секції при змінах моменту навантаження на валу ВРД і напругах живлення 60 та 30 В.

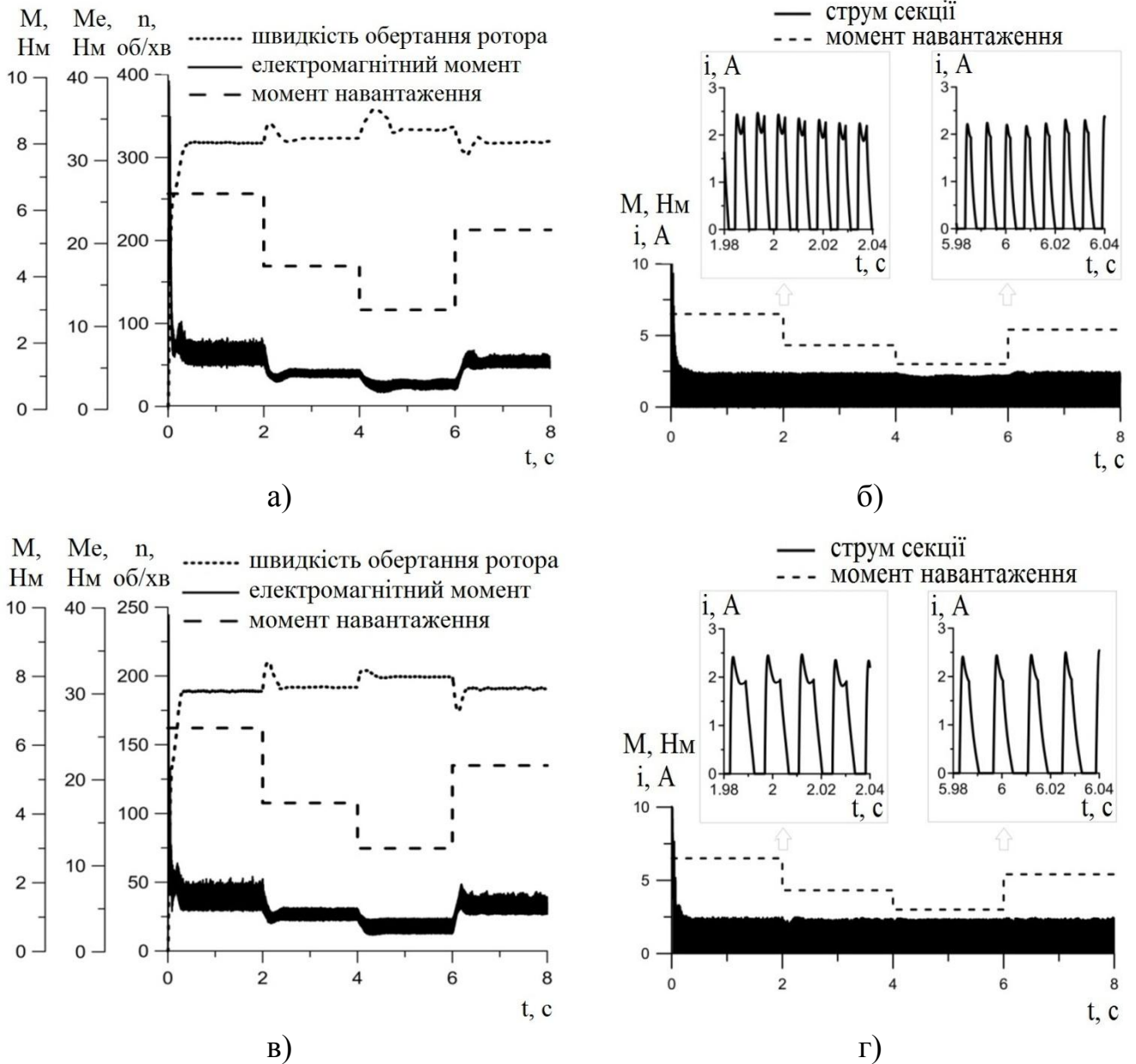
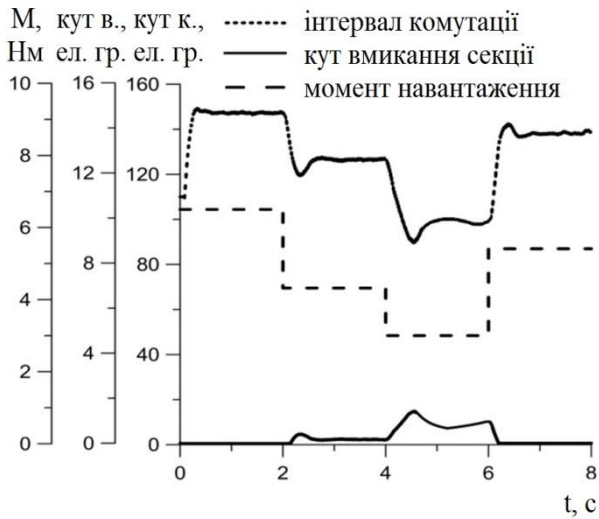
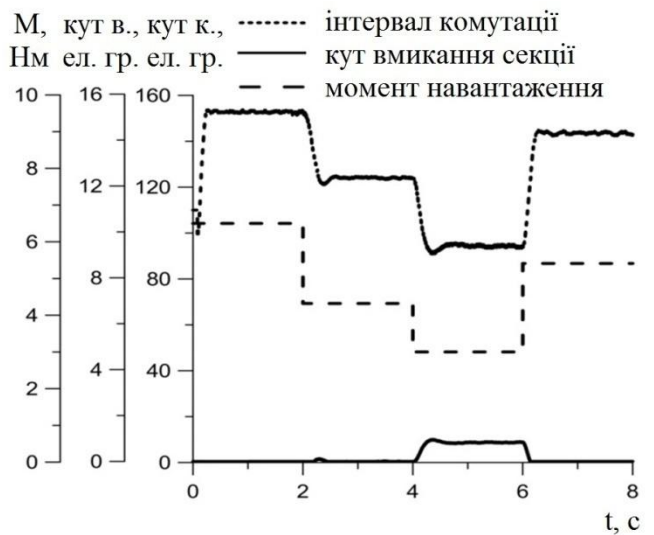


Рис. 7. Швидкість обертання, електромагнітний момент та струм фази ВРД при використанні нейронної мережі виду 6-10-3 при змінах моменту навантаження і нарузі живлення: а, б – 60 В; в, г – 30 В

Отримані результати підтверджують, що в заданому діапазоні зміни моменту навантаження нейроконтролер на основі мережі прямого поширення сигналу виду 6-10-3 дозволяє формувати доволі жорсткі механічні характеристики (похибка становить не більше 6 % відносно абсолютно жорстких характеристик) при різних напругах живлення. Отже, синтезований нейроконтролер забезпечує як необхідну точність ідентифікації кута положення ротора ВРД, так і достатні регульовальні властивості шляхом зміни інтервалу комутації.



а)

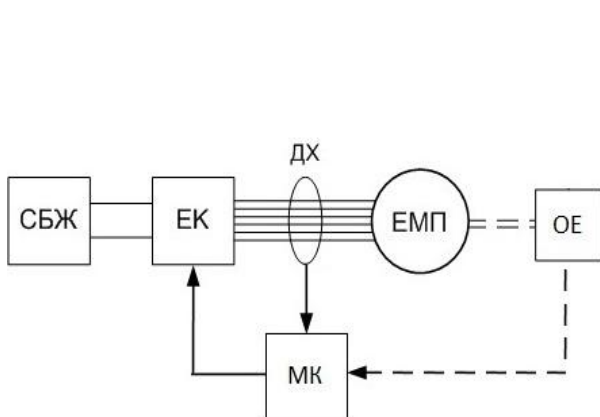


б)

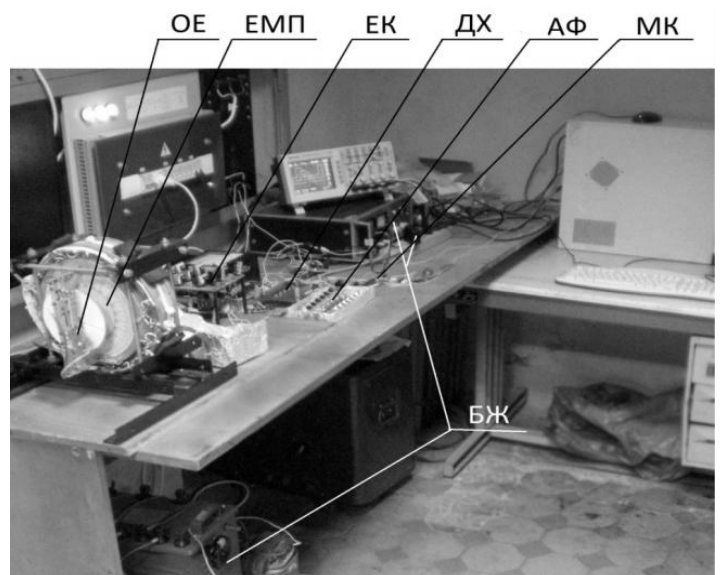
Рис. 8. Кути вмикання та комутації секції, визначені нейроконтролером на базі нейронної мережі виду 6-10-3, при змінах моменту навантаження на валу ВРД і напрузі живлення: а – 60 В; б – 30 В

У четвертому розділі описано експериментальну установку та результати фізичного моделювання.

Експериментальна установка складається з наступних елементів (рис. 9): силовий блок живлення (СБЖ), електронний комутатор (ЕК), датчі струму на основі ефекту Холла (ДХ), електромеханічний перетворювач (ЕМП), мікроконтролер з АЦП (МК) та оптичний енкодер (ОЕ), який виконує роль ДПР. Для дослідження обрано шестифазний ВРД U-подібної конструкції 24/22. Нейроестиматор реалізовано на 32-розрядному мікроконтролері STM32F407VGT6 компанії STMicroelectronics.



а)



б)

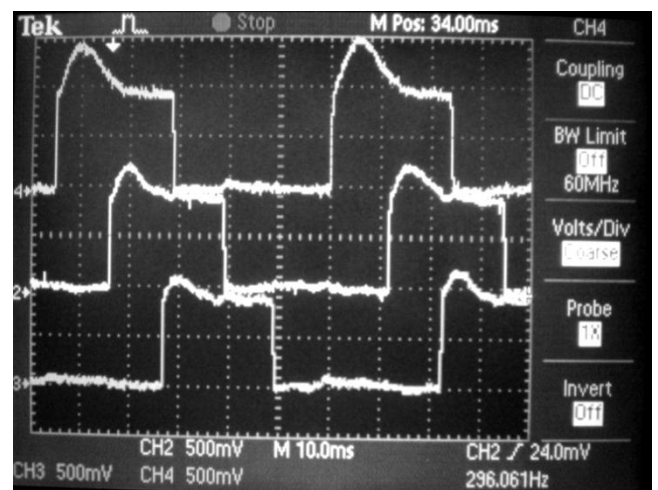
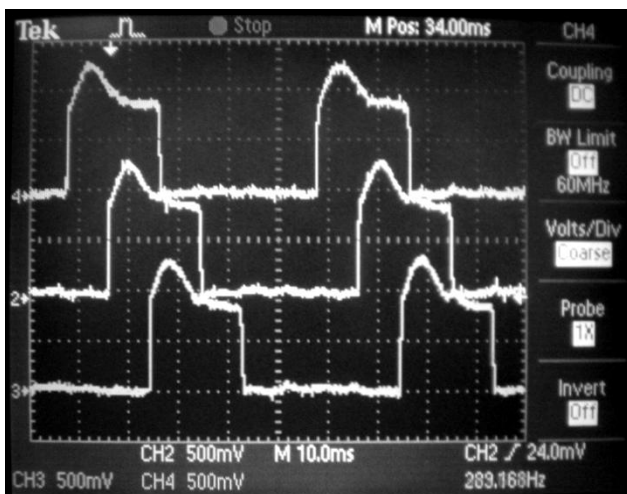
Рис. 9. Експериментальна установка: а – структурна схема; б – загальний вигляд



При наборі навчальних даних для нейронної мережі положення ротора визначалося мікроконтролером за сигналами ОЕ і відповідно формувалися керуючі впливи на транзисторні ключі ЕК. Сигнали датчиків струму після проходження через активний ФНЧ Бесселя 3-го порядку (АФ) зчитувалися АЦП МК і записувалися на SD карту. Після збору даних і навчання нейронної мережі було синтезовано нейроестиматор, який перебрав функцію оптичного енкодера. Нейронна мережа має вид 7-10-1: входніми величинами є фазні струми і напруга живлення, вихідною – кут положення ротора. Напруга живлення включена до входних даних тому, що її легко вимірювати і вона дещо покращує точність мережі, однак вона не є обов'язковою вимірюваною величиною. Активаційна функція нейронів прихованого шару – гіперболічний тангенс.

Знято осцилограми струмів трьох фаз ВРД з нейроестиматором та ДПР при різних напругах живлення і моментах навантаження для низьких швидкостей обертання (рис. 10).

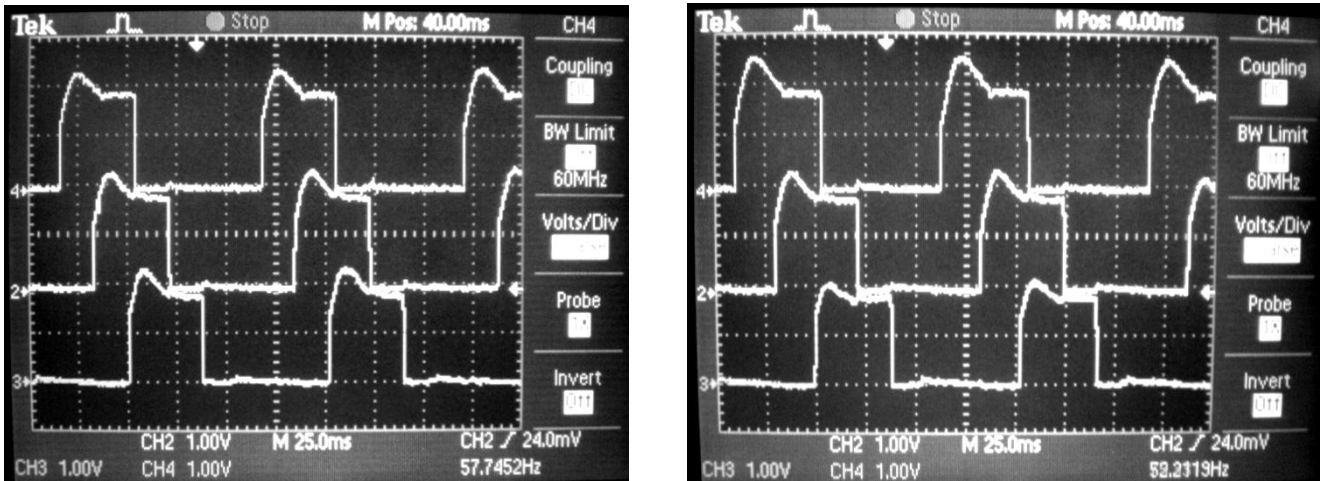
Наведені результати підтвердили працездатність запропонованої структури бездавачевого керування. Збільшення швидкості обертання приводить до того, що контролер не встигає опрацювати інформацію, що призводить до погіршення роботи системи. Це пов'язано з високою дискретизацією обчислень необхідною для даного типу двигуна.



a)



b)



в)

Рис. 10. Осцилограми відфільтрованих сигналів датчиків струму трьох фаз ВРД з ДПР (зліва) і з нейроконтролером (справа): а – при моменті навантаження 1 Нм і напрузі живлення 10 В; б – при моменті навантаження 3 Нм і напрузі живлення 15 В; в – при моменті навантаження 5 Нм і напрузі живлення 15 В

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведене нове вирішення науково-прикладної задачі створення бездавачевої системи керування ВРД із застосуванням нейроестиматора кута положення ротора або нейроконтролерів, які поєднують функцію визначення кута положення ротора та формування керуючих впливів.

Виконані в дисертаційній роботі дослідження дали змогу зробити наступні висновки:

1. Аналіз існуючого стану бездавачевих систем визначення положення ротора ВРД на основі нейронних мереж дозволяє зробити висновок про актуальність задачі створення нейроестиматорів та нейроконтролерів, придатних до практичної реалізації як з точки зору точності ідентифікації координати та кількості математичних операцій для отримання результату, так і можливості вимірювання необхідних для роботи нейроконтролера вхідних величин в реальних умовах.

2. Синтезований нейроестиматор на основі штучної нейронної мережі прямого поширення сигналу, яка у якості вхідних величин використовує лише фазні струми, забезпечує необхідну точність визначення положення ротора при зміні напруги живлення від  $0,45U_n$  до  $1,6U_n$  та зміні моменту навантаження  $0,25 \div 1,6M_n$ .

3. Запропонований на основі штучної нейронної мережі Кохонена та використання стратегії «переможець забирає все» нейроконтролер забезпечує класифікацію сектора розміщення кута положення ротора, подальшу швидку ідентифікацію положення ротора і формування керуючих впливів на ключі перетворювача при значно простішій структурі і меншій кількості необхідних обчислень у порівнянні з мережею з активаційною функцією Гауса у вихідному шарі самоорганізуючої карти Кохонена.

4. Результати математичного моделювання систем із запропонованою структурою нейроестиматора та нейроконтролера формування керуючих імпульсів на ключах комутатора дозволяють стверджувати, що мережа прямого поширення сигналу виду 6-10-1 та мережа на основі самоорганізуючої карти Кохонена забезпечують коректну роботу ВРД як у квазіусталених, так і в перехідних режимах роботи, а максимальне значення відносної похибки положення ротора, визначеного бездавачевою системою, не перевищує 10 %. Похибка ідентифікації кута положення ротора мережею виду 6-10-1, яка спричиняє зміщення моментів включення та виключення ключів комутатора, призводить до зміни амплітуди та форми струмів, зростання середнього значення величини струму максимум на 5 % та збільшення пульсацій електромагнітного моменту на 6 % у порівнянні з традиційною системою керування з давачем положення ротора. Гірша якість керування ключами комутатора ВРД нейроконтролером на основі карти Кохонена спричинює зростання середніх значень струму на 11–17 % та виникнення більших коливань електромагнітного моменту (в найгірших випадках удвічі).

5. На основі штучної нейронної мережі прямого поширення сигналу виду 6-10-3 синтезовано нейроконтролер, який, крім положення ротора, визначає кути вмикання і комутації, що дозволяє формувати жорсткі механічні характеристики ВРД, тобто одночасно реалізує функції естиматора та контролера. Результати математичного моделювання підтверджують, що сформовані нейроконтролером штучні механічні характеристики визначаються похибкою не більше 6 % відносно абсолютно жорстких характеристик « $n=\text{const}$ ».

6. Результати, отримані на експериментальній установці, підтверджують правильність рішень, прийнятих при синтезі нейроестиматора на основі мережі прямого поширення сигналу, та працездатність запропонованого методу прямого визначення положення ротора ВРД. Застосування нейромережових технологій для тихохідних вентильних реактивних двигунів вимагає застосування потужних мікроконтролерів або спеціалізованого апаратного забезпечення для реалізації штучної нейронної мережі.

Таким чином, виконані в дисертаційній роботі дослідження є подальшим розвитком інтелектуальних підходів до реалізації бездавачевих систем керування ВРД. Отримані результати дають змогу стверджувати, що застосування нейронних мереж дозволяє створити бездавачеву систему визначення положення ротора ВРД, яка працює на основі безпосередніх вимірювань струму та напруги. Окрім функції естиматора кута положення ротора нейронна мережа може одночасно реалізувати і функції контролера формування штучних механічних характеристик чи сигналів керування на ключах комутатора, що дозволить, у свою чергу, спростити систему керування при застосуванні ВРД.

## ПУБЛІКАЦІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Бобечко Ю. О. Застосування штучних нейронних мереж прямого поширення сигналу для ідентифікації положення ротора вентильного реактивного двигуна / Ю. О. Бобечко, І. Р. Головач, А. О. Лозинський // Вісник НУ «Львів-

ська політехніка» «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – Львів, 2011. – № 707. – С. 9–15.

2. Бобечко Ю. О. Синтез нейрорегулятора для формування жорстких характеристик вентильного реактивного двигуна / Ю. О. Бобечко, А. О. Лозинський // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2011. – №4(80). – С. 51–55.

3. Бобечко Ю. О. Застосування мережі Кохонена у бездавачевій системі керування вентильним реактивним двигуном / Ю. О. Бобечко, А. О. Лозинський // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика» науково-виробничого журналу. – Кременчук, 2012. – Вип. 3(19) – С. 531–532.

4. Бобечко Ю. О. Застосування згладжування даних нейронної мережі для використання в системах керування вентильним реактивним двигуном / Ю. О. Бобечко // Научный вестник ДГМА. – 2011. – № 2(8Е). – С. 37–41.

5. Бобечко Ю. О. Нейроестиматор для бездавачевої системи керування вентильним реактивним двигуном / Ю. О. Бобечко // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 3. – С. 89–90.

## АНОТАЦІЯ

**Бобечко Ю. О. Синтез та аналіз нейроконтролера системи керування вентильним реактивним двигуном.** – *На правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2015.

Дисертація присвячена розв'язанню науково-прикладної задачі синтезу бездавачевої системи ідентифікації положення ротора та керування вентильним реактивним двигуном на основі теорії штучних нейронних мереж. Для цього синтезовано ряд нейронних мереж, спільною рисою яких є набір вхідних величин: струми фаз та іноді напруга живлення, а також відсутність величини потокозчеплення, яка використовується в абсолютній більшості бездавачевих систем керування.

Для подальших досліджень вибрано три нейронні мережі, а саме: прямого поширення сигналу для ідентифікації кута положення ротора; із самоорганізуючою картою Кохонена і навчальною парадигмою «переможець забирає все» для визначення сигналів на ключах керування; прямого поширення сигналу для визначення кута положення ротора, а також вмикання і комутації секції, величини яких дозволяють формувати жорсткі механічні характеристики.

Працездатність синтезованих нейроестиматорів/нейроконтролерів на основі описаних нейронних мереж підтверджена результатами комп'ютерного моделювання. Окрім того, правильність запропонованих рішень підтвердили експериментальні дослідження мікропроцесорної реалізації нейроестиматора кута положення ротора.

**Ключові слова:** вентильний реактивний двигун, бездавачева система керування, штучна нейронна мережа, нейроестиматор, нейроконтролер.

## АННОТАЦИЯ

**Бобечко Ю. О. Синтез и анализ нейроконтроллера системы управления вентильным реактивным двигателем.** – *На правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2015.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной задачи синтеза бездатчиковой системы идентификации положения ротора и управления вентильным реактивным двигателем (ВРД) на основании теории искусственных нейронных сетей.

Проанализированы области и перспективы применения ВРД, рассмотрены их конструктивные особенности и датчик положения ротора (ДПР) как отдельный элемент ВРД. Указаны основные преимущества и недостатки ВРД и традиционной системы управления с применением ДПР. Проведен аналитический обзор работ, посвященных методам косвенного определения положения ротора, которые разделены на две группы: активные и пассивные. Подробно рассмотрено использование искусственных нейронных сетей в электромеханических системах в целом и в бездатчиковых системах управления ВРД в частности. На основании проведенного анализа сформулированы требования к новым бездатчиковым системам управления на основании нейронных сетей.

Рассмотрена проблематика синтеза нейронной сети, приведены основные рекомендации относительно выбора структуры искусственной нейронной сети, активационных функций нейронов и метода обучения, формирования учебных данных. Проанализированы уравнения потокосцепления и определено, что производная угла положения ротора является функцией токов, производных токов фаз и напряжения питания.

Для формирования учебной базы данных и в дальнейшем в качестве базы для моделирования работы ВРД с синтезированными бездатчиковыми системами управления использована математическая модель ВРД, адекватность которой подтверждена совпадением результатов математического моделирования и физического эксперимента.

С учетом описанной теоретической базы был синтезирован ряд нейронных сетей, общей чертой которых является набор входных величин: фазные токи и иногда напряжение питания, а также отсутствие величины потокосцепления, которая используется в абсолютном большинстве бездатчиковых систем управления.

Для дальнейших исследований были избраны три нейронные сети, а именно: прямого распространения сигнала для идентификации угла положения ротора; с самоорганизующейся картой Кохонена и учебной парадигмой «победитель забирает все» для определения сигналов на ключах управления; прямого распространения сигнала для определения угла положения ротора, а также включения и коммутации секции, величины которых позволяют формировать жесткие механические характеристики.

Для исследования бездатчиковых систем управления модель силовой части ВРД была дополнена соответствующими моделями, которые реализуют нейронные сети. Для улучшения точности результатов предложено использовать математическую обработку исходных величин нейронных сетей.

Результаты компьютерного моделирования подтвердили работоспособность предлагаемых бездатчиковых систем управления: максимальное значение относительной погрешности угла положения ротора, определенного нейроэстиматором, не превышает 10 %, а сформированные нейроконтроллером искусственные механические характеристики определяются погрешностью не более 6 % относительно абсолютно жестких характеристик « $n = \text{const}$ ».

Кроме того, правильность предложенных решений подтвердили экспериментальные исследования микропроцессорной реализации нейроэстиматора угла положения ротора. Таким образом, применение нейронных сетей позволило синтезировать нейроэстиматоры /нейроконтроллеры, которые работают на основании непосредственных измерений токов и напряжения питания.

**Ключевые слова:** вентильный реактивный двигатель, бездатчиковая система управления, искусственная нейронная сеть, нейроэстиматор, нейроконтроллер.

## ABSTRACT

**Bobechko Y. O. Synthesis and analysis of neurocontroller for a switched reluctance motor control system.** – *Manuscript copyright.*

The thesis for PhD degree in technical sciences on the specialty 05.09.03 – electrotechnical complexes and systems. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2015.

The thesis is devoted to solving a scientific and applied problem of synthesis of the sensorless rotor position identification system and control of a switched reluctance motor based on the theory of artificial neural networks. For this purpose a series of neural networks, the common feature of which is a set of input variables: phase currents and sometimes supply voltage, and deficiency of linkage values used in the majority of sensorless control systems, was synthesized.

For further researches three neural networks were selected, namely: the direct signal propagation to identify the position angle of the rotor; selforganized map of Kohonen and educational paradigm "winner takes all" to determine the signals to the control keys; direct signal propagation to determine the rotor position, sections switching-on and commutation angles, the values of which allow to form a flat speed-torque characteristics.

The efficiency of the synthesized neuro-estimators/neurocontrollers based on the described neural networks was confirmed by the results of computer modeling. In addition, the accuracy of the proposed solutions was confirmed by the experimental researches of the microprocessor implementation of the neuro-estimator of rotor position angle.

**Keywords:** switched reluctance motor, sensorless control system, artificial neural network, neuro-estimator, neurocontroller.