

Міністерство освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту

БОГАТИР ЮЛІЯ ІВАНІВНА



УДК 625.151.3:004.032.26

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ  
ВИКОНАВЧИМИ ПРИСТРОЯМИ СТАНЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗАЛІЗНИЧНОЇ  
АВТОМАТИКИ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків - 2016

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електротехніки та електричних машин Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, доцент  
**Блиндюк Василь Степанович,**  
Український державний університет залізничного транспорту, кафедра електротехніки та електричних машин, доцент кафедри, проректор з науково-педагогічної роботи.

**Офіційні опоненти** доктор технічних наук, професор  
**Фурман Ілля Олександрович,**  
Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, кафедра автоматизації та комп'ютерних технологій, завідувач кафедри;

кандидат технічних наук, доцент  
**Маловічко Володимир Володимирович,**  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка  
В. Лазаряна, кафедра автоматики, телемеханіки та зв'язку,  
доцент кафедри.

Захист відбудеться "17" червня 2016 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.820.04 в Українському державному університеті залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Українського державного університету залізничного транспорту за адресою: 61050, м. Харків, майдан Фейєрбаха, 7.

Автореферат розіслано "15" травня 2016 р.

В. о. ученого секретаря  
спеціалізованої вченої ради



О. М. Огар

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Ефективність і конкурентоспроможність залізниць в значною мірою залежить від швидкості і інтенсивності руху поїздів. Разом з тим при їх збільшенні зростають вимоги до безпеки руху. Загальносвітовою тенденцією є заміна старих релейних систем електричної централізації на комп'ютерні, що дозволяє звести до мінімуму вплив людського чинника та істотно розширити функціональні можливості. Можливість ведення архіву подій у роботі мікропроцесорної централізації дозволяє своєчасно інформувати експлуатаційний штат про передвідмовний стан системи і сприяє своєчасному виявленню дійсних причин відмов.

У стрілочних електроприводах (СП) застосовуються електричні двигуни постійного струму (ДПС) з послідовним збудженням асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненою обмоткою на роторі та безконтактні керовані двигуни (ДБУ). До недоліків ДПС відноситься наявність колекторного вузла, який вимагає частого технічного огляду, періодичного ремонту і заміни. Недоліком АД є те, що пусковий момент менший від номінального та чутливість до зміни параметрів мережі. Відмови, що виникають за рахунок перелічених вище недоліків, призводять до затримок поїздів, що спричиняє собою великі економічні втрати. Швидке виявлення несправності дає можливість у найкоротший строк усунути або попередити її. При безперервному автоматичному контролі можливо прогнозувати інтервали часу, протягом яких об'єкт повинен працювати справно, локалізувати несправність – визначити місце, тип. Це дуже важливо, оскільки не менше 60 – 80 % часу йде на пошук і визначення несправності. Таким чином удосконалення методів керування та контролю виконавчими пристроями станційних систем залізничної автоматики є актуальним науково-прикладним завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки (затверджена Наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 14 жовтня 2008 р. № 1259), Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки (Постанова Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р.), Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, яку схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. №1555-р. Автор брав участь як виконавець у науково-дослідних роботах за темами «Дослідження та розробка ресурсозберігаючих технологій експлуатації залізничних станцій та вузлів» (номер держреєстрації 0108U000078) та «Дослідження і розробка методів автоматизованого управління рухомим складом залізничного транспорту» (номер держреєстрації 0111U002240).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є вирішення науково-прикладного завдання удосконалення методів керування та контролю виконавчими пристроями станційних систем залізничної автоматики шляхом забезпечення в реальному масштабі часу безперервного моніторингу їх режимів роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз наукових підходів і принципів побудови методів контролю та керування виконавчими пристроями систем централізації стрілок і сигналів і визначити шляхи їх удосконалення;

- розробити нейромережеву модель пристрою контролю параметрів стрілочного електропривода постійного струму, що дозволить у реальному масштабі часу урахувати характер зміни пускових і робочих характеристик при виникненні різних пошкоджень;

- розробити нейромережеву модель пристрою контролю функціонування стрілочного електропривода змінного струму, що дозволить визначати передвідмовний стан виконавчих пристроїв, тим самим скоротити кількість відмов;

- розробити метод керування безконтактним двигуном стрілочного електропривода, що дозволить незалежно від стану впливів, що його збурюють, забезпечити безперервну зміну струму, моменту й швидкості обертання ротора за заданим законом;

- розробити нейромережеву модель регулятора системи керування безконтактним двигуном стрілочного електропривода, який, на відміну від існуючого, дозволить демпфірувати автоколивання у всьому заданому діапазоні функціонування електропривода й тим самим забезпечити його сталу роботу;

- розробити методи та моделі, які можуть бути покладені в основу побудови пристроїв контролю стрілочних електроприводів постійного та змінного струмів, що, на відміну від існуючих, дозволять у реальному масштабі часу урахувати вплив комутаційних процесів на їхні пускові та робочі характеристики при виникненні різних пошкоджень;

- провести техніко-економічну оцінку впровадження результатів дисертаційної роботи.

*Об'єкт дослідження* – процес керування та контролю виконавчими пристроями станційних систем залізничної автоматики.

*Предмет дослідження* – методи і моделі керування та контролю виконавчими пристроями станційних систем залізничної автоматики.

**Методи дослідження.** Побудова імітаційної моделі виконавчих пристроїв стрілочного електропривода базується на теорії електричних кіл, теорії електричних машин і теорії диференціальних рівнянь; методах програмного моделювання, регресійного аналізу та із застосуванням нейромережевих технологій. Для перевірки адекватності побудованих моделей використовувався апарат математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукова новизна полягає в теоретичному обґрунтуванні завдання підвищення якості експлуатації стрілочних електроприводів систем залізничної автоматики шляхом подальшого удосконалення методів керування та контролю їх виконавчими пристроями.

*Вперше:*

- на основі теорії штучних нейронних мереж (НМ) запропоновано метод контролю параметрів стрілочного електропривода з двигуном постійного струму, який дає змогу у реальному масштабі часу урахувати характер зміни пускових і робочих характеристик при виникненні різних пошкоджень;

- розроблено нейромережеву модель прогнозування якості роботи стрілочного електропривода змінного струму, яка дозволяє визначати передвідмовний стан виконавчих пристроїв стрілочного привода;

- розроблено метод керування безконтактним двигуном стрілочного електропривода, який дозволяє незалежно від стану впливів, що його збурюють, забезпечити безперервну зміну струму, моменту й швидкості обертання ротора за заданим законом.

*Вдосконалено:*

- нейромережеву модель регулятора системи керування стрілочним електроприводом з безконтактним електродвигуном стрілочного електропривода, який, на відміну від існуючих, дозволяє демпфірувати автоколивання у всьому заданому діапазоні роботи електропривода і тим самим забезпечити його стійку роботу.

*Знайшли подальший розвиток:*

- імітаційні моделі, що відображають пускові режими роботи стрілочних електроприводів постійного та змінного струмів які були покладені в основу побудови пристроїв контролю їхнього стану, що, на відміну від існуючих, дозволяють в реальному масштабі часу відстежувати зміну пускових характеристик двигуна СП при виникненні порушень в їх роботі.

**Практичне значення одержаних результатів.** Здобуті в дисертації наукові результати дозволили розробити методи контролю технічного стану двигунів СП постійного та змінного струму, що дозволяють вчасно виявляти їх пошкодження за пусковими та робочими характеристиками і прогнозувати їхню подальшу роботу. Впровадження нейромережевої моделі пристрою контролю технічного стану СП з асинхронним двигуном дозволило визначати його працездатний стан у реальному масштабі часу. Розроблений нейромережевий регулятор системи керування безконтактним двигуном СП дозволяє демпфірувати автоколивання у всьому заданому діапазоні функціонування електропривода й тим самим забезпечити його сталу роботу.

Результати окремих розділів роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі автоматики та комп'ютерного телекерування рухом поїздів, кафедрі електротехніки та електричних машин та Навчально-наукового інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту (УкрДУЗТ) при підготовці фахівців служб сигналізації та зв'язку. Основні наукові результати дисертації передано для впровадження в 2015 р. на ДП «Південна залізниця»: рекомендації з удосконалення методів керування та контролю виконавчими пристроями станційних систем залізничної автоматики. Практичне впровадження результатів роботи підтверджується відповідними актами впровадження, які наведені в додатках до роботи. Упровадження вищевказаних розробок дає змогу з підвищеною достовірністю визначити робочий стан виконавчих пристроїв стрілочних електроприводів, що забезпечує більш ефективне регулювання руху поїздів та виконання маневрових робіт. Очікується, що загальна сума економічного ефекту від впровадження запропонованих методів контролю та керування виконавчими

пристроями систем централізації стрілок і сигналів та застосування їх протягом шести років складе 194,478 тис. грн.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні положення і результати, що виносяться на захист, отримано автором самостійно та проводилися в Українському державному університеті залізничного транспорту. Крім того, у публікаціях, у яких відображено основні результати дисертації та які написано у співавторстві, здобувачу належать: [2] – розроблено імітаційну модель магнітоелектричного двигуна СП та проведено аналіз пускових та робочих характеристик отриманих на її основі; [3] – обґрунтовано доцільність використання векторного способу керування магнітоелектричним двигуном СП; [4] – розроблено імітаційні моделі виконавчих пристроїв СП та проведено аналіз отриманих характеристик; [5] – проведено аналіз отриманих на основі імітаційної моделі асинхронного двигуна характеристик при виникненні порушень у роботі привода; [8] – побудовано замкнену систему керування безконтактним керованим двигуном СП; [9] – розроблено нейромережевий перетворювач керуючого сигналу у замкненій системі керування; [10] – розроблено нейромережевий контролер, який діагностує робочий стан виконавчого пристрою; [11] – проведено аналіз попередніх досліджень; [15] – проведено аналіз досліджень в галузі моделювання машин з постійними магнітами; [16] - розроблено імітаційну модель двигуна з постійними магнітами СП.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися і схвалені на науково-технічних конференціях:

- 23-й та 24-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Перспективні комп'ютерні керуючі і телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України» (м. Алушта, 2010, 2011 рр.);

- IV Міжнародній науково-практичній конференції «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті» (Україна, пгт. Чинадієво, 2011 р.);

- 26-й Міжнародній конференції «Внедрение перспективных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и средств телекоммуникации на базе цифровизации» (м. Алушта, 2013 р.);

- 27-й Міжнародній конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Харків, 2014 р.);

- 74, 76, 77-й Міжнародних науково-технічних конференціях «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 2012, 2014, 2015 рр.);

Дисертацію в повному обсязі розглянуто та схвалено на розширеному засіданні кафедри електротехніки та електричних машин Українського державного університету залізничного транспорту.

**Публікації.** Відповідно до теми дисертації опубліковано 19 наукових праць, з яких 9 статей (з них 2 без співавторів), що опубліковані у фахових виданнях затверджених Міністерством освіти і науки України (2 статті включені до міжнародних наукометричних баз) 1 патент на винахід, додаткові праці – 1 патент на корисну модель і 8 тез доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота містить вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел та додатки. Повний обсяг роботи становить 151 сторінку, обсяг основного тексту складає 128 сторінок друкованого

тексту(5 сторінок зайняті на повну площу 2 рисунками і 2 таблицями), 51 рисунок, 28 таблиць, список використаних джерел складається з 140 найменувань і 4 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дослідження, сформульовано мету роботи, подано загальну характеристику дисертаційної роботи і визначено її наукову новизну і практичну цінність.

У **першому розділі** зосереджено результати аналізу основних систем керування стрілочним електроприводом, систем контролю та діагностики стрілочних електроприводів.

Вагомий внесок у процес дослідження і вдосконалення роботи систем залізничної автоматики внесли такі вчені, як В.С. Аркатов, М.М. Бабаєв, В.С.Блиндюк, А.Б. Бойник, А.М. Брилеєв, В.І. Гаврилюк, В.С. Дмитрієв, І.В.Жуковицький, Г.І. Загарій, В.В. Скалозуб, Н.Ф.Котляренко, Ю.А. Кравцов, В.М.Лисенков, В.А. Мінін, В.І. Мойсеєнко, С.В. Панченко, А.С. Переборов, А.П.Разгонов, Ю.В. Соболев, М.Н.Чепцов, Н.Е. Федоров, Ю.М. Резніков, John William Leis, Michael Corinthios, Vimal K. Bose, С. Хайкин, и др.

Сучасні СП повинні гарантовано забезпечувати показники безпеки руху потягів і бути високонадійними. Необхідно знижувати експлуатаційні витрати на їх утримання шляхом створення не обслуговуваних технологій. Тенденції досягнення високих швидкостей руху висувають жорсткіші вимоги до надійності технічних засобів, що забезпечують безпеку руху потягів по стрілочному переводу. Це пов'язано зі зростанням динамічних навантажень, що призводить до інтенсифікації негативних процесів, що впливають на елементи стрілочного переводу і гарнітуру.

Аналіз попередніх досліджень, присвячених розробленню наукових підходів до формування та удосконалення існуючих методів контролю та керування виконавчими пристроями систем централізації стрілок і сигналів, показав, що у своїй більшості вони не відповідають вимогам, що висуваються до них. При створенні систем залізничної автоматики особливу увагу приділяють забезпеченню безпеки. Якщо пристрій, побудований за принципом виключення небезпечних відмов, має невисоку безвідмовність, то при несправностях будуть неминучі затримки поїздів, пов'язані зі значними економічними втратами. Для зменшення затримок поїздів необхідно скорочувати час виявлення та усунення відмов.

Автоматизовані засоби технічної діагностики систем залізничної автоматики і телемеханіки завдяки періодичному контролю їх параметрів дозволяють не тільки вчасно виявити несправність, а й відстежити тенденцію змін цих параметрів.

У вирішенні глобальних проблем транспортних комплексів найважливіше місце займає створення, використання інтелектуальних транспортних систем (ІТС). Вони акумулюють і інтегрують передові досягнення сучасних досліджень і розробок в областях телекомунікацій, інформаційних технологій і т.д..

У **другому розділі** розглянуто методи контролю якості функціонування виконавчих пристроїв стрілочних приводів. Розроблено імітаційні моделі двигунів СП постійного та змінного струму, враховуючи основні співвідношення (рис. 1).

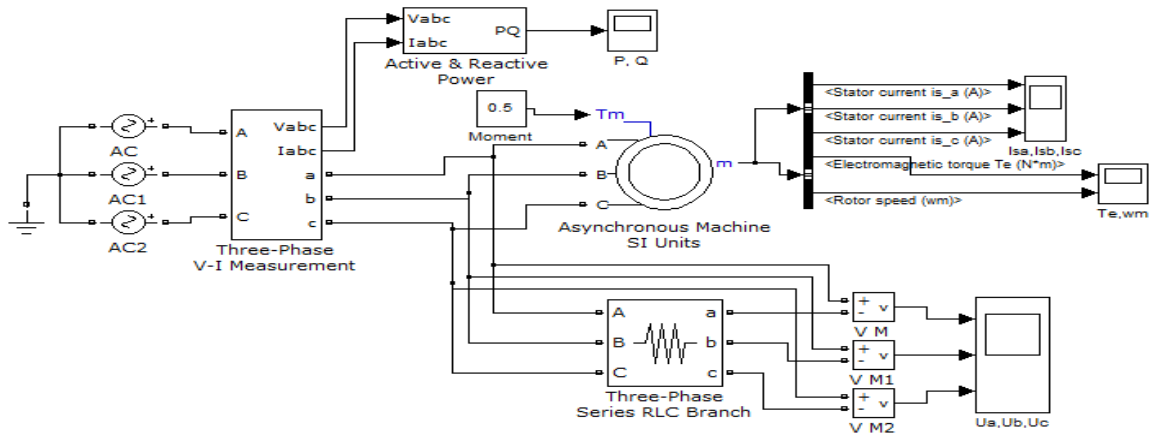


Рисунок 1 – Імітаційна модель двигуна стрілочного привода змінного струму

Рівняння електричної частини асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором мають вигляд

$$\begin{aligned}
 U_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} + \omega \Psi_{ds}, \\
 U_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} + \omega \Psi_{qs}, \\
 U_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + (\omega - \omega_r) \Psi_{dr}, \\
 U_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - (\omega - \omega_r) \Psi_{qr}, \\
 T_e &= 1.5 (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}),
 \end{aligned} \tag{1}$$

де  $\Psi_{qs}, \Psi_{ds}$  – проєкції потокозчеплення статора на осі d, q;  
 $\Psi_{qr}, \Psi_{dr}$  – проєкції потокозчеплення ротора на осі d, q;  
 $L_s, L_r$  – повні індуктивності статора і ротора;  
 $L_m$  – індуктивність кола намагнічування;  
 $R_s, R_r$  – активний опір статора і ротора;  
 $U_{qs}, i_{qs}, U_{ds}, i_{ds}$  – проєкції напруги і струму статора на осі q, d;  
 $\omega_r$  – кутова частота обертання ротора;  
 $T_e$  – електромагнітний момент.

Механічну частину асинхронного двигуна можна подати як

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{2H} (T_e - F \omega_r - T_m), \tag{2}$$

$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r, \tag{3}$$

де  $H$  – сумарна інерційна постійна машини і навантаження;  
 $F$  – сумарний коефіцієнт в'язкого тертя;  
 $T_m$  – механічний момент на валу;  
 $\theta_r$  – кутове положення ротора.



За результатами побудованої моделі, розроблено нейромережеву модель, яка в реальному масштабі часу дозволяє забезпечити прогнозування ефективності роботи СП та здійснювати їх контроль за технічним станом і проведено її навчання.

Для побудови замкненої системи керування виконавчим пристроєм стрілочного привода було розроблено імітаційну модель безконтактного керованого двигуна (рис. 2).

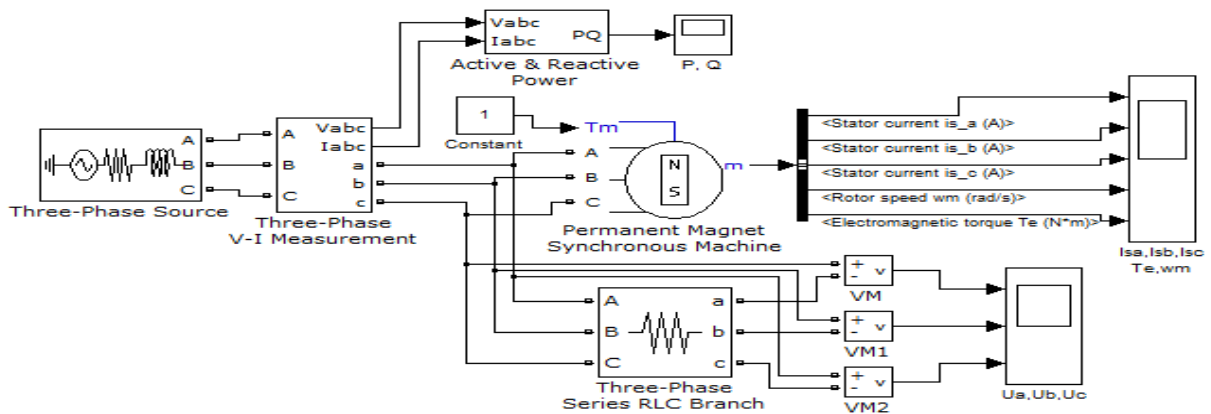


Рисунок 2 – Імітаційна модель безконтактного керованого двигуна стрілочного привода

Електрична частина двигуна з постійними магнітами на роторі подана у вигляді рівнянь

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_d &= \frac{1}{L_d} U_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q; \\ \frac{d}{dt} i_q &= \frac{1}{L_q} U_q - \frac{R}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\lambda p \omega_r}{L_q}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $L_d, L_q$  - осі індуктивностей;  
 $R$  – опір обмоток статора;  
 $i_d, i_q$  – осі струму;  
 $U_d, U_q$  – осі напруги;  
 $\omega_r$  - кутова швидкість ротора;  
 $\lambda$  – амплітуда індукваного струму постійних магнітів фази статора;  
 $p$  – кількість пар полюсів.

Механічна частина електродвигуна має вигляд

$$\begin{aligned} T_e &= 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q]; \\ \omega_r &= \frac{1}{j} \int_{-\infty}^{\infty} (T_e - T_H) dt, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $T_e$  – електромагнітний момент;  
 $j$  – момент інерції;  
 $T_H$  - момент навантаження.

Часові залежності швидкості обертання ротора та електромагнітного моменту безконтактного керованого двигуна наведено на рис. 3.

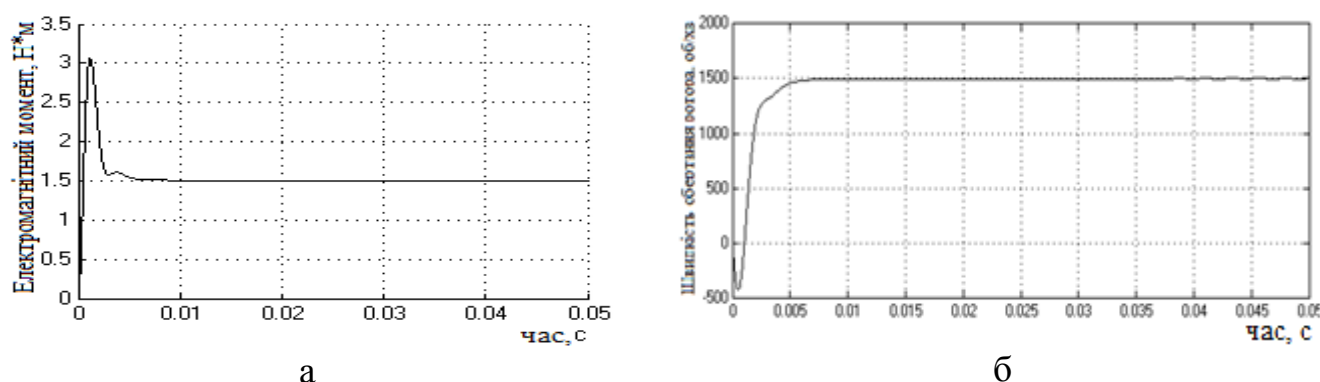


Рисунок 3 – Часові залежності безконтактного керованого двигуна стрілочного привода: а) електромагнітного моменту; б) швидкості обертання ротора

Отримані результати моделювання дають змогу побудувати замкнену систему керування виконавчим пристроєм СП, яка дозволяє незалежно від стану збурюючих впливів забезпечити стійку роботу стрілочного привода.

Для перевірки розроблених моделей на адекватність у роботі використано методи математичної статистики, а саме регресійний аналіз:

$$y = \vartheta_0 + \vartheta_1 x + u, \quad (6)$$

де  $y$  – випадкова величина, розподіл якої залежить від деякої незалежної  $x$ ,  $y = \{y_1, y_2 \dots y_n\}$ ;

$x$  – вектор спостережань за незалежною змінною,  $x = \{x_1, x_2 \dots x_n\}$ ;  $\vartheta_0, \vartheta_1$  – невідомі параметри регресійної моделі;

$u$  – випадкові відхилення моделі  $u = \{u_1, u_2 \dots u_n\}$ .

Побудовано просту лінійну регресійну модель залежності зміни струму в обмотці статора двигуна змінного струму ( $y$ ) унаслідок зміни навантаження на валу двигуна ( $x$ ). Отримано рівняння регресії

$$\check{y} = 0,34 + 0,4x.$$

Для визначення щільності зв'язку між двома змінними застосовується кореляційний аналіз. Силу лінійного кореляційного зв'язку кількісних ознак вимірює коефіцієнт кореляційного відношення Пірсона ( $r$ ). Величина обчисленого лінійного коефіцієнта кореляції склала  $r=0,997$ , що свідчить про те, що зв'язок дуже високий. Додатна величина коефіцієнта кореляції свідчить про прямий зв'язок між  $x$  і  $y$ .

Коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,997^2 = 0,994$  показує, що в досліджуваній ситуації 99,4 % загальної дисперсії витрат звернення пояснюються змінами навантаження на валу двигуна, тоді як на решту всіх неврахованих чинників припадає 0,6 % мінливості витрат звернення.

Оцінку статистичної значущості рівняння регресії в цілому і окремих параметрів регресії і кореляції в роботі здійснено за допомогою F-критерію Фішера і t-критерію Стьюдента.

Розраховане фактичне значення F-критерія ( $F_{\text{факт}} = 119,4$ ) більше табличного ( $F_{\text{табл}} = 5,12$ ), отже, рівняння регресії визнається значущим. Табличне значення t-критерію для числа ступенів свободи  $k = n - 2 = 9$  і рівня значущості  $p=0,05$  складає  $t_{\text{табл}}=2,26$ . Фактичні значення більші за табличні. Отже, параметри  $\vartheta_0, \vartheta_1$  і  $R$  статистично значущі. Пояснена дисперсія значно більше, ніж не пояснена, а отже модель є адекватною. Перевірку адекватності імітаційних моделей ДБУ та ДПС проведено за допомогою інструменту аналізу даних «Регресія» в MS Excel. При цьому встановлено, що розроблені моделі є адекватними.

У **третьому розділі** розглянуто метод контролю параметрів СП з АД, який дозволяє в реальному масштабі часу урахувати характер зміни пускових та робочих характеристик при виникненні різних пошкоджень. З використанням розробленої у другому розділі імітаційної моделі проведено аналіз часових залежностей параметрів двигуна СП змінного струму при зміні напруги живлення (рис. 4 а) та обриві однієї з фаз (рис. 4 б).

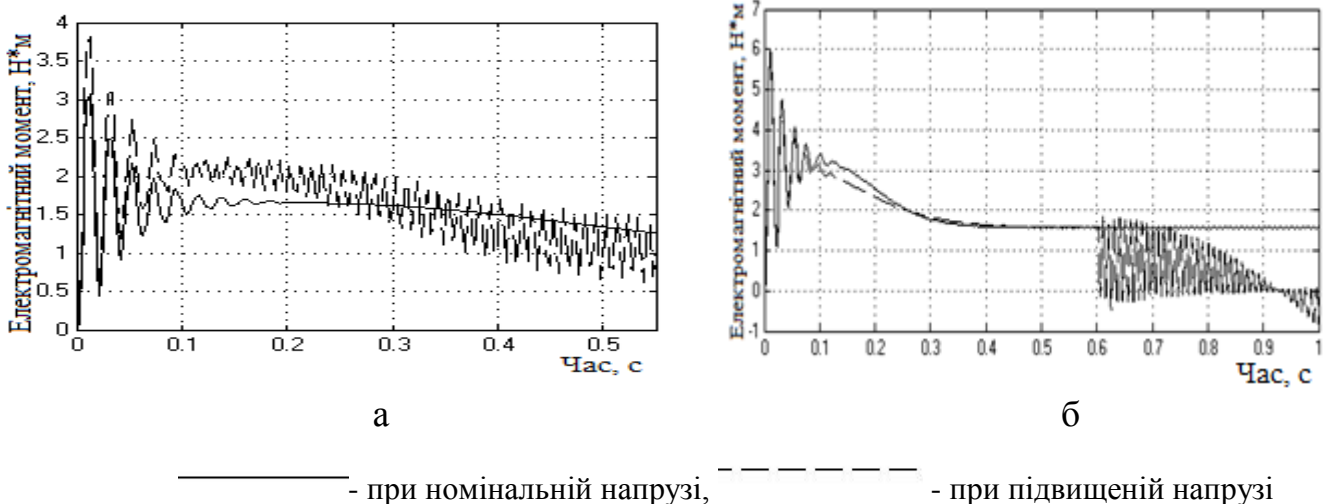
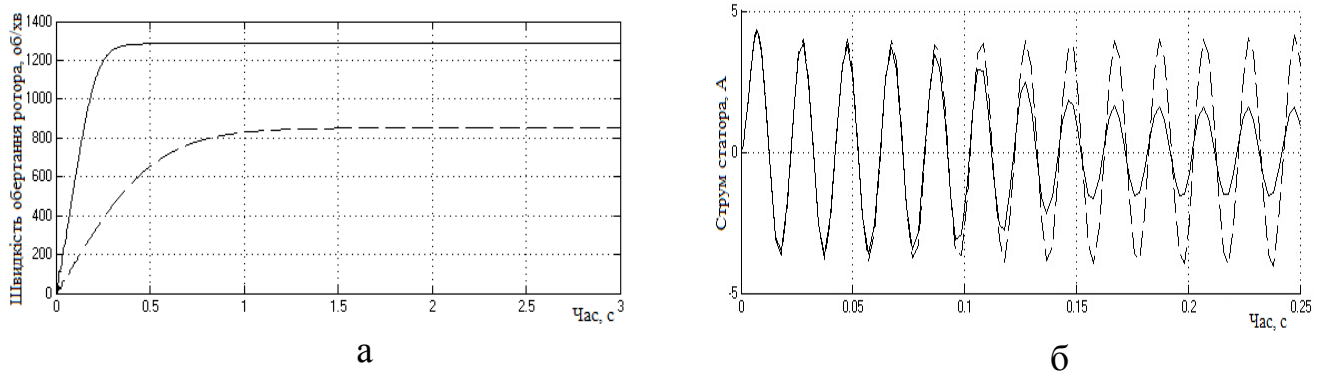


Рисунок 4 – Часові залежності: а) електромагнітного моменту при зміні напруги живлення; б) обриві однієї з фаз

Проведений аналіз часових залежностей параметрів АД показав, що при збільшенні напруги в одній фазі струм у цій фазі збільшується, а в останніх двох зменшується. Електромагнітний момент збільшується в момент пуску, а в сталому режимі набуває синусоїдальної форми. Швидкість обертання ротора збільшується. Ротор двигуна при зниженій напрузі мережі не розвиває номінальну швидкість.

При обриві однієї фази статора струм у ній відсутній, а в останніх двох збільшується за амплітудою і фазовий зсув в них стає  $180^\circ$ . Електромагнітний момент набуває синусоїдальної форми і період його коливань удвічі менше від періоду коливань живлячої напруги. Частота обертання ротора двигуна різко знижується. При роботі двигуна з пошкодженими стрижнями обмотки ротора частота його обертання буде менша, ніж за відсутності несправності (рис. 5 а). У нього зростає час розгону, ковзання і додаткові втрати, зменшується коефіцієнт

потужності. Двигун з пошкодженими стрижнями, що працює під навантаженням, споживає з мережі збільшений струм (рис. 5 б).



— - при номінальному опорі ротора; - - - - - при обриві стрижня ротора  
Рисунок 5 - Часові залежності при обриві стрижня ротора: а) швидкості обертання ротора; б) струму статора

Після проведеного аналізу було виявлено, що при виникненні пошкоджень в асинхронному двигуні виникає асиметрія струмів в обмотках статора. Вимірюючи швидкість обертання ротора, струми статора і порівнюючи їх з номінальними, можна оцінювати робочий стан двигуна безперервно.

Проведено аналіз часових залежностей параметрів двигуна стрілочного привода постійного струму при зміні напруги живлення та при зміні опору якоря з використанням імітаційних моделей, розроблених у другому розділі. Отримані дані зведено до табл. 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання двигуна СП постійного струму

Вимірювані параметри	Напруга живлення, В			Опір обмотки якоря, Ом		
	128 (-20%)	160 (ном.)	208 (+30%)	1,73 (-20%)	2,16 (ном.)	2,8 (+30%)
Струм при пуску, А	21,3 (20%)	26,62	34,61 (30%)	28,68 (+7,7%)	26,62	24,07 (-9,6%)
Струм у сталому режимі, А	2,606 (2,65%)	2,677	2,759 (3,1%)	2,58 (-3,6%)	2,677	2,8 (+4,5%)
Електромагнітний момент при пуску, Н·м	134 (35,8%)	209	354 (69,4%)	243 (+16,3%)	209	171 (-18,1%)
Електромагнітний момент у сталому режимі, Н·м	2.005 (5,2%)	2,115	2.247 (6,2%)	1.97 (-6,9%)	2,115	2.31 (+9,2%)
Швидкість обертання якоря, об/хв	1395 (19,8%)	1740	2246 (29,1%)	1828 (+5%)	1740	1638 (-5,9%)

Зі збільшенням напруги струм в обмотці збудження, електромагнітний момент і швидкість обертання якоря при пуску двигуна і в сталому режимі змінюються пропорційно. При зменшенні опору якоря двигуна струм і електромагнітний момент при пуску менші від номінальних, а в сталому режимі роботи значення цих параметрів перевищують значення при нормальній роботі двигуна. Швидкість обертання якоря зі збільшенням опору якоря зменшується.

Отримані часові залежності параметрів двигунів СП при зміні умов експлуатації дають змогу встановити залежність, як саме змінюються їх характеристики при виникненні тих або інших несправностей. Вимірюючи швидкість обертання ротора, струми статора і порівнюючи їх з номінальними, можна оцінювати робочий стан двигунів безперервно.

За результатами моделювання побудовано нейромережеві моделі контролю в реальному часі робочого стану виконавчих пристроїв СП з двигунами змінного та постійного струму. Для вирішення завдання контролю асиметрії струмів статора АД побудовано нейромережу з прямою передачею сигналу і зворотним розповсюдженням помилки (рис. 6). Навчальною послідовністю для нейромережі є зміна значення струму у фазі статора двигуна, де значення на виході позначатимуть: «1» - двигун працює справно, «0» - струм фази перевищує допустимі межі, «-1» - струм у фазі нижчий за допустимі межі. Дана нейромережа містить три входи ( $X_1, X_2, X_3$ ) і три виходи ( $Y_1, Y_2, Y_3$ ), три шари – два прихованих і один вихідний. Перший шар складається з трьох нейронів, дев'ять нейронів – у другому шарі і три нейрони у вихідному шарі. Як функцію активації застосовано сигмоїдальну функцію, яка матиме форму гіперболічного тангенса, з огляду на те, що необхідна функція активації має область значень від -1 до +1.

У процесі навчання на вибраній послідовності помилка зменшується до кінця навчання (рис. 7) і її мінімальне значення досягається на чотирнадцятому циклі, її значення складає  $1,4182 \cdot 10^{-9}$ .

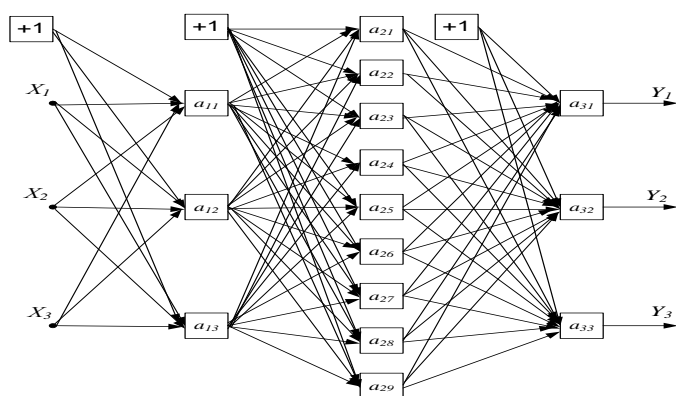
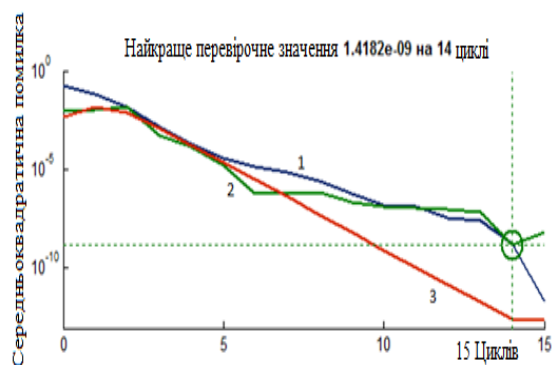


Рисунок 6 – Нейромережева модель контролю асиметрії струмів статора асинхронного двигуна



1 – навчальна множина; 2 – перевірна множина; 3 – тестуюча множина

Рисунок 7 – Зміна помилки мережі в процесі її навчання

Для обробки отриманих результатів контролю робочого стану виконавчого пристрою стрілочного привода змінного струму і визначення виниклої несправності була побудована нейромережа з прямим розповсюдженням сигналу і зворотним розповсюдженням помилки (рис. 8), яка має три входи і чотири виходи. Дана нейромережа так само містить три шари: два прихованих і один вихідний. Перший шар містить три нейрони, другий – 10 нейронів, третій, вихідний, – чотири нейрони.



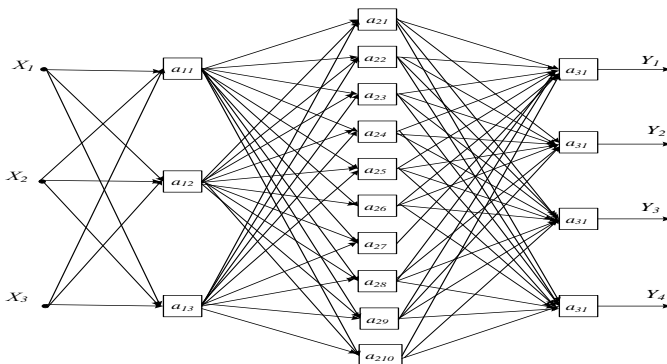
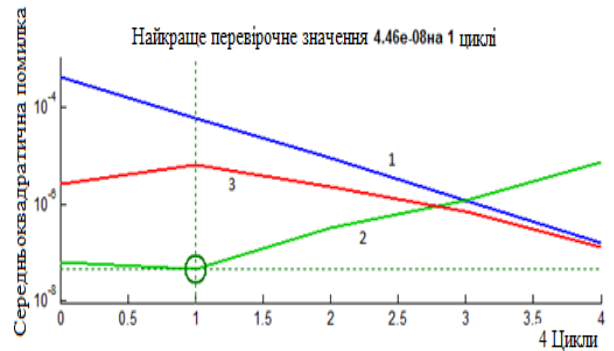


Рисунок 8 – Нейромережева модель визначення несправності виконавчого пристрою стрілочного привода змінного струму



1 – навчальна множина; 2 – перевірна множина, 3 – тестуюча множина

Рисунок 9 – Зміна помилки мережі в процесі її навчання

При аналізі характеристик двигуна при виникненні різних несправностей було виведено такі основні залежності: при обриві фази струм у цій фазі відсутній, а в останніх однаково завищений; при обриві стрижня ротора струм в обмотках статора збільшується; якщо в одній фазі напруга підвищена, то струм у цій фазі теж збільшується, а в останніх стає нижчим номінального. Виходячи з цього за кожним виходом нейромережі закріплюємо певну несправність:  $Y_1$  – «1» - двигун працює справно, «0» - виникло пошкодження;  $Y_2$  – «0» - обрив фази статора, «1» - несправність відсутня;  $Y_3$  – «0» - обрив стрижня ротора, «1» - несправність відсутня;  $Y_4$  – «0» - змінилася напруга в одній фазі, «1» - несправність відсутня. Помилка навчання нейромережі зменшується до кінця процесу навчання (рис. 9). Мінімальне значення помилки досягається на першому циклі і складає  $4,46 \cdot 10^{-8}$ .

Нейромережева модель контролю в реальному часі робочого стану СП постійного струму з ДПС побудована аналогічно розглянутим. Для вирішення завдання контролю робочого стану ДПС побудовано НМ з прямою передачею сигналу і зворотним розповсюдженням помилки. Мережа містить дванадцять входів і два виходи, три шари – два прихованих і один вихідний. Перший шар складається з дванадцяти нейронів, другий має чотирнадцять нейронів і третій – два нейрони. На перші шість входів поступають вибірки з датчика струму, на другі – з датчика швидкості. Вважатимемо, що при зміні струму обмотки якоря і швидкості обертання якоря в межах до 10 % номінальних характеристик двигун працює справно. Якщо характеристики перевищують 10 % - у двигуні виникли пошкодження. Процес навчання склав 35 ітерацій глобального циклу, внаслідок чого було отримано вагові коефіцієнти. Помилка навчання НМ зменшується до кінця процесу навчання. Мінімальне значення помилки по трьох кривих досягається на 35 циклі і складає  $1,21 \cdot 10^{-11}$ . Максимальна помилка склала 0,00103, що задовольняє поставлені умови.

Для обробки отриманих результатів контролю робочого стану СП з ДПС і визначення виниклої несправності побудовано НМ, яка має два входи і один вихід і містить три шари: два прихованих і один вихідний. Перший шар містить два нейрони, другий – 10 нейронів, третій, вихідний – один нейрон. Помилка навчання нейромережі зменшується до кінця процесу навчання. Мінімальне значення

помилки по трьох кривих досягається на 39 циклі і складає  $4,6655 \cdot 10^{-7}$ . Максимальна помилка склала 0,00068, що задовольняє поставлені умови. Отже, результат навчання можна вважати за адекватний.

Функції регресії результатів, отриманих на виході мережі, свідчить про відповідність цільових даних до вихідних значень. Таким чином, можна судити про те, що побудована НМ є адекватною і дозволяє вирішити поставлене завдання. З проведеного аналізу побудованих нейромережевих моделей контролю робочого стану виконавчих пристроїв СП можна зробити висновок, що вони є адекватними, помилки навчання малими. Дані моделі виконують поставлені завдання.

У четвертому розділі розглянуто метод керування ДБУ СП із замкненою системою регулювання

$$\Phi(p) = \frac{W(p)}{1W(p)} = \frac{R(p)}{R(p)+Q(p)}, \quad (7)$$

де  $p - \frac{d}{dt}$  – алгебраїзований оператор диференціювання;  
 $R(p)$  и  $Q(p)$  – деякі поліноми від  $p$ .

У схемі керування безконтактним керуванням двигуном застосовуються два контури керування: внутрішній цикл синхронізує імпульси комутатора з електрорушійною силою, зовнішній цикл регулює швидкість двигуна, змінюючи напругу на керуваному джерелі напруги. Для дослідження часових характеристик двигуна розроблено імітаційну модель (рис. 10).

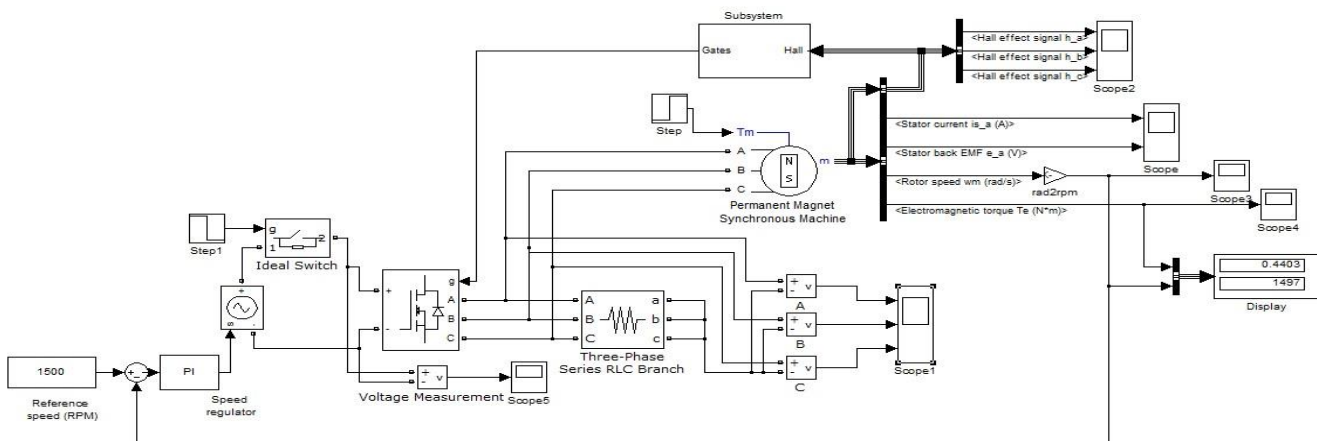


Рисунок 10 – Імітаційна модель керування ДБУ із замкненою системою регулювання

Сигнал з джерела напруги поступає на комутатор, у якому постійна напруга перетворюється в трифазну, і подається на ДБУ. Сигнал, що керує, на джерело живлення поступає з датчика швидкості руху ротора по каналу зворотного зв'язку через регулятор швидкості. Регулятор швидкості застосовується як пропорційно-інтегральний регулятор (ПІ-регулятор), який реалізується включенням у зворотний зв'язок резистора і конденсатора. На вхід такого регулятора поступає різниця задавального сигналу і сигналу зворотного зв'язку. Сигнал керування змінюється до

тих пір, поки не буде досягнута рівність задавального сигналу і сигналу зворотного зв'язку, тобто поки не буде усунена помилка регулювання.

Результати моделювання (рис. 11) свідчать, що запропонований метод керування ДБУ СП із замкнутою системою регулювання дозволяє незалежно від стану впливів, що його збурюють, забезпечити безперервну зміну струму, моменту й швидкості обертання ротора за заданим законом.

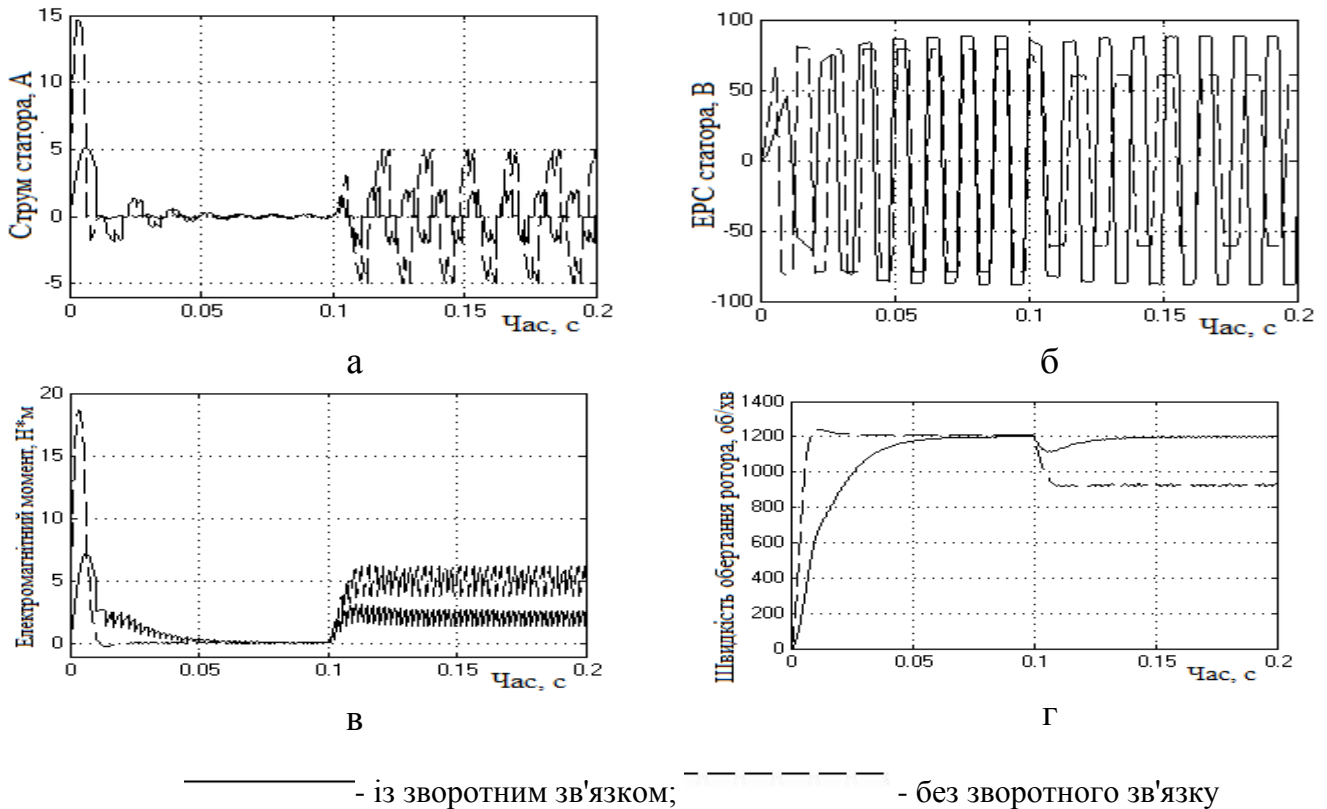


Рисунок 11 – Часові залежності із зворотним зв'язком і без нього: а) струму статора; б) ЕДС статора; в) електромагнітного моменту; г) швидкості обертання ротора

Із застосуванням нейронних мереж у роботі побудовано регулятор системи керування ДБУ СП (рис. 12) у вигляді одношарового перцептрона, який має три входи і шість виходів; один шар, що складається з шести нейронів, сполучених за допомогою вагових коефіцієнтів. Як функція активації перцептрона використовується одинична функція активації з жорсткими обмеженнями (hardlim).

Налаштування параметрів перцептрона здійснюється з використанням навчальної множини. Навчальною послідовністю даної нейромережі є сигнали ЕРС, що знімаються з обмоток статора, цільовими значеннями є шість керованих сигналів, які поступають на інвертор напруги. Процес навчання НМ склав 4 ітерації глобального циклу, найменша помилка складає 0,75 на нульовому циклі (рис. 13).

Результат навчання адекватний, оскільки завершальна середньоквадратична помилка мала, перенавчання не відбулося.



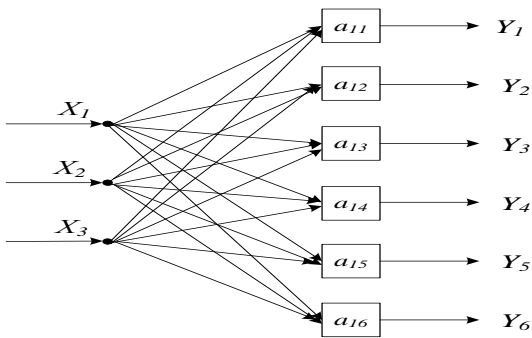


Рисунок 12 – Одношаровий перцептрон системи керування ДБУ СП



Рисунок 13 – Зміна помилки НМ в процесі її навчання

У заключній частині розділу проведено техніко-економічне обґрунтування ефективності розроблення і впровадження замкненої системи керування виконавчим пристроєм стрілочного привода. У результаті розрахунків встановлено, що період окупності проекту з урахуванням інфляції складає 4 роки, чистий дисконтований дохід від її впровадження на станції, яка містить 38 стрілочних приводів, на розрахунковий період 6 років становить 194,477 тис. грн. Зважаючи на вище перераховані чинники можна зробити висновок що проект є ефективним та економічно доцільним.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено науково-прикладне завдання підвищення ефективності експлуатації стрілочних електроприводів систем централізації стрілок і сигналів шляхом подальшого вдосконалення методів контролю і керування їх виконавчими пристроями.

1. Аналіз основних етапів розвитку сучасних систем залізничної автоматики показав, що впровадження мікропроцесорної елементної бази дозволяє істотно розширити функціональні можливості пристроїв керування стрілками і сигналами. Існуючі стрілочні електроприводи повинні гарантовано забезпечувати показники безпеки руху поїздів і бути високонадійними, що може бути реалізовано шляхом впровадження автоматизованих систем технічного діагностування і контролю ефективності їх експлуатації.

2 Розроблено нейромережеву модель пристрою контролю параметрів стрілочного електропривода постійного струму, яка дозволяє у реальному масштабі часу урахувувати характер зміни пускових і робочих характеристик при виникненні пошкоджень. Максимальна помилка навчання нейромережі склала  $6,8 \cdot 10^{-4}$ , що дозволяє вирішити поставлене завдання.

3. Розроблено нейромережеву модель пристрою контролю функціонування стрілочного привода змінного струму, яка дозволяє визначати передвідмовний стан виконавчого пристрою. Мінімальне значення помилки навчання нейромережі досягається на першому циклі і складає  $4,46 \cdot 10^{-8}$ .

4. Розроблено метод керування безконтактним керованим двигуном стрілочного електропривода з замкненою системою керування, яка незалежно від стану збурюючих дій забезпечує сталу роботу привода. При цьому проведено

дослідження ефективності роботи розробленого стрілочного електропривода, величина обчисленого лінійного коефіцієнта кореляції склала 0,92.

5. Розроблено нейромережеву модель регулятора системи керування безконтактним двигуном стрілочного електропривода, який, на відміну від існуючого дозволяє демпфувати автоколивання у всьому заданому діапазоні роботи електропривода і тим самим забезпечує його стійку роботу. Процес навчання нейромережі склав 4 ітерації, найменша помилка склала 0,75 на нульовому циклі, перенавчання не відбулося.

6. Розроблено методи та моделі виконавчих пристроїв стрілочних приводів постійного та змінного струму, що, на відміну від існуючих, дозволили в реальному масштабі часу враховувати вплив комутаційних процесів на пускові та робочі характеристики двигунів стрілочних приводів змінного та постійного струму при виникненні різних пошкоджень. При цьому обчислений коефіцієнт кореляції для ДПС склав 0,99; для АД – 0,997; для ДБУ – 0,9996.

6. Проведено техніко-економічну оцінку впровадження результатів дисертаційної роботи, яка показала, що загальна сума економічного ефекту від впровадження запропонованих методів контролю та керування виконавчими пристроями систем централізації стрілок і сигналів і застосування їх протягом шести років складе 194,478 тис. грн.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Основні наукові праці:

1. Богатырь Ю.И. Анализ существующих стрелочных электроприводов [Текст] / Ю.И. Богатырь // Зб. наук. праць Дон. інст. зал. трансп. – Донецьк, 2009. – Вип. 18. – С. 55 – 61.

2. Бабаев М.М. Підвищення ефективності роботи стрілочних електроприводів Ч 1 [Текст] / М.М. Бабаев, Ю.И. Богатырь // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – 2010. – Вип. 116. – С. 110 – 115.

3. Бабаев М.М. Повышение эффективности работы стрелочных электроприводов Ч 2 [Текст] / М.М. Бабаев, Ю.И. Богатырь // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – 2011. – Вип. 122. – С. 51 – 55.

4. Бабаев М.М. Компьютерное моделирование двигателей стрелочных электроприводов [Текст] / М.М. Бабаев, Ю.И. Богатырь // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – 2011. – Вип. 124. – С. 164 – 172.

5. Бабаев М.М. Имитационное моделирование временных зависимостей параметров асинхронных двигателей стрелочных электроприводов [Текст] / М.М. Бабаев, В.С. Блиндюк, Ю.И. Богатырь // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-т залізнич. трансп. – 2015. – Вип. 154. – С. 120 – 126.

6. Богатырь Ю.И. Проверка адекватности имитационной модели замкнутой системы управления исполнительным устройством стрелочного привода [Текст] / Ю.И. Богатырь // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-т залізнич. трансп. – 2015. – Вип. 157. – С. 169 – 175.

7. Богатырь Ю.И. Анализ существующих методов и средств управления стрелками и сигналами на железнодорожных станциях [Текст] / Ю.И. Богатырь //

Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2009. – №4. – С. 60-65.

8. Пат. на винахід 10143 Україна, МПК Н 04 К 3/00 Н 03 J 7/00 Стрілочний електропривід / М.М. Бабаєв, В.С. Блиндюк, О.М. Ананьєва, Ю.І. Богатир; заявник і патентоволодар Українська державна академія залізничного транспорту. – № а 201201334, заявл. 23.09.2011; опубл. 25.03.2012, Бюл. №6. – 5 с.

*Публікації у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз:*

9. Бабаєв М.М. Управление стрелочным электроприводом с применением нейросетевого преобразователя управляемого сигнала [Текст] / М.М. Бабаєв, В.С.Блиндюк, Ю.И. Богатырь // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – № 4. – С. 79-84.

10. Бабаєв М.М. Нейросетевая модель контроля рабочего состояния исполнительного устройства стрелочного привода переменного тока в реальном времени [Текст] / М.М. Бабаєв, В.С. Блиндюк, Ю.И. Богатырь // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДАЗТ, 2015. – № 5. – С.25-31.

**Праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:**

11. Пат. на корисну модель 68099 Україна, МПК В 61 L 5/00 Стрілочний електропривід / М.М. Бабаєв, В.С. Блиндюк, О.М. Ананьєва, Ю.І. Богатир; заявник і патентоволодар Українська державна академія залізничного транспорту. – № u 201111437, заявл. 28.09.2011; опубл. 12.03.2012, Бюл. № 5. – 5 с.

**Праці апробаційного характеру:**

12. Бабаєв М.М. Модель синхронного двигателя с постоянными магнитами: тези доп. 23-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Перспективні комп'ютерні керуючі і телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України» (м. Алушта, вересень 2010р.) / М.М. Бабаєв, Ю.И. Богатырь // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – Вип. 2. – С. 118.

13. Богатырь Ю.И. Моделирование бесконтактных управляемых двигателей стрелочных электроприводов: тези доп. 24-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Перспективні комп'ютерні керуючі і телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України» (м. Алушта, вересень 2011 р.) / Ю.И. Богатырь // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – Вип. 5. – С. 122.

14. Бабаєв М.М. Моделирование стрелочных электроприводов с постоянными магнитами: тези доп. IV Міжнар. наук.-практ. конф. «Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті» (пгт. Чинадієво, лютий 2011 р.) / М.М. Бабаєв, Ю.И. Богатырь // Зб. наук. праць Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. академіка Лазаряна. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2011. – Вип. 2. – С. 9.

15. Богатир Ю.І. Модель замкнутої системи управління стрілочним електроприводом: тези доп. 74-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 2012 р.) / Ю.І. Богатир // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізн. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2012 р. – Вип. 129. – С. 206.

16. Богатырь Ю.И. Адаптивные системы управления исполнительным устройством стрелочного электропривода: тезисы докл. 26-й Междунар. научн.-техн. конф. «Внедрение перспективных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и средств телекоммуникации на базе цифровизации» (г. Алушта, сентябрь 2013 г.) / Ю.И. Богатырь // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – Вип. 4 (дод.). – С. 106.

17. Богатир Ю.І. Застосування нейромережевого програмування в системі керування стрілочним електроприводом: тези доп. 27-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (м. Харків, 2014 р.) / Ю.І. Богатир // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2014. – Вип. 4 (дод.). – С. 58.

18. Богатир Ю.І. Застосування нейрорегуляторів в системі керування виконавчим пристроєм стрілочного електропривода: тези доп. 76-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 2014 р.) / Ю.І. Богатир // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 143 – С. 233.

19. Богатир Ю.І. Застосування нейроконтролерів для діагностування та виявлення передвідмовного стану виконавчих пристроїв стрілочних електроприводів: тези доп. 77-ї Міжнар. наук.-техн. конф. «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (м. Харків, 2015 р.) / Ю.І. Богатир // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2015. – Вип. 151 (Т.1). – С. 61.

## АНОТАЦІЯ

Богатир Ю.І. Удосконалення методів керування та контролю виконавчими пристроями станційних систем залізничної автоматики. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.20 - експлуатація та ремонт засобів транспорту. - Український державний університет залізничного транспорту МОН України, Харків, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладного завдання підвищення якості експлуатації стрілочних електроприводів систем централізації стрілок і сигналів шляхом подальшого удосконалення методів контролю і керування їх виконавчими пристроями.

У роботі на основі теорії штучних нейронних мереж запропоновано метод контролю параметрів стрілочних електроприводів, який дає можливість у реальному масштабі часу прогнозувати ефективність роботи їх виконавчих пристроїв. З метою дослідження пускових і робочих характеристик двигунів стрілочних електроприводів розроблено їхні імітаційні моделі. Розроблено метод керування безконтактним керованим двигуном стрілочного електропривода, який дозволяє, незалежно від впливу збурюючих дій, забезпечити безперервну зміну струму, моменту і швидкості обертання ротора за заданим законом і вдосконалено його нейромережеву модель.

**Ключові слова:** стрілочний електропривод, двигун, замкнена система керування, нейромережа, імітаційна модель, адекватність.

## АННОТАЦИЯ

Богатырь Ю.И. Усовершенствование методов управления и контроля исполнительными устройствами станционных систем железнодорожной автоматики. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.22.20 – эксплуатация и ремонт средств транспорта. – Украинский государственный университет железнодорожного транспорта МОН Украины, Харьков, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению научно-прикладного задания повышения качества эксплуатации стрелочных электроприводов систем централизации стрелок и сигналов путём дальнейшего усовершенствования методов контроля и управления их исполнительными устройствами.

В работе на основе теории искусственных нейронных сетей предложен и теоретически обоснован метод контроля параметров стрелочных электроприводов, который в отличие от существующих, даёт возможность в реальном масштабе времени прогнозировать эффективность работы их исполнительных устройств. С целью исследования пусковых и рабочих характеристик двигателей стрелочных электроприводов постоянного тока при воздействии на них внешних факторов и возникновении различных повреждений в процессе работы разработана имитационная модель, которая позволила создать соответствующую базу данных. Результаты моделирования использованы в процессе обучения нейронных сетей при реализации устройства контроля их технического состояния и эффективности функционирования. Проверка на адекватность разработанной модели осуществлялась методом регрессионного анализа. При этом оценка статистической значимости уравнения регрессии в целом и отдельных параметров регрессии и корреляции была проведена с помощью F-критерия Фишера и t-критерия Стьюдента.

Разработана нейросетевая модель контроля параметров стрелочного электропривода постоянного тока. Для обучения сети выбран алгоритм градиентного спуска. В процессе выполнения работы установлено, что максимальная ошибка обучения составила 0,00103, что удовлетворяет поставленные условия. Показано, что ошибка обучения нейросети уменьшается к концу процесса обучения. Минимальное значение ошибки по трём кривым достигается на 35 цикле и составляет  $1,21 \cdot 10^{-11}$ . Для обработки полученных результатов контроля и определения возникшей в двигателе неисправности была построена нейросеть с прямым распространением сигнала и обратным распространением ошибки. Максимальная ошибка обучения сети составила 0,00068, что удовлетворяет поставленные условия. Минимальное значение ошибки по трём кривым достигается на 39 цикле и составляет  $4,6655 \cdot 10^{-7}$ .

Разработана нейросетевая модель прогнозирования эффективности работы стрелочного электропривода переменного тока, которая, в отличие от существующих, позволяет осуществлять контроль по техническому состоянию. Обучающей последовательностью для данной нейросети являются полученные значения на выходах нейросети контроля параметров электропривода переменного

тока с асинхронным двигателем. Максимальная ошибка обучения составила 0,00068, что удовлетворяет поставленные условия. Минимальное значение ошибки достигается на первом цикле и составляет  $4,46 \cdot 10^{-8}$ . Разработан метод управления бесконтактным двигателем стрелочного электропривода, который, в отличие от существующих, позволяет, независимо от влияния возмущающих воздействий, обеспечить непрерывное изменение тока, момента и скорости вращения ротора по заданному закону. Усовершенствована нейросетевая модель регулятора системы управления бесконтактным двигателем стрелочного электропривода, который, в отличие от существующего, построенного на базе логических элементов, позволяет демпфировать автоколебания во всем заданном диапазоне работы электропривода и тем самым обеспечивает его устойчивую работу. Проведена проверка на адекватность всех разработанных моделей. Расчётный экономический эффект внедрения данного инвестиционного проекта на станции, которая на которой есть 38 стрелочных приводов на расчётный период 6 лет составляет 194,477 тис. грн.

**Ключевые слова:** стрелочный электропривод, двигатель, замкнутая система управления, нейросеть, имитационная модель, адекватность.

## ABSTRACT

**Bohatyr Yu.I. The improvement of management and control methods of executive devices of railway automation station systems.** – Manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Science on speciality 05.22.20 – operation and maintenance of means of transport. – Ukrainian State University of Railway Transport, MES of Ukraine, Kharkov, 2016.

The present work is dedicated to the solution of a scientific applied task concerning the improvement of the quality of the maintenance of electric switch mechanisms of switch and signal interlocking systems by means of subsequent improvement of control and management systems of their executive devices.

A method to control the parameters of electric switch mechanisms that gives the possibility to forecast the efficiency of their executive devices real-time work has been proposed in the work on the basis of artificial neural network theory. In order to investigate trigger and operating characteristics of engines of electric switch mechanisms their simulation models have been developed. A method of managing noncontact controlled engine of electric switch mechanism that allows (independently on influence of perturbation effects) providing continuous change of current, torque and speed of a rotor rotation according to the preset law has been developed and its neural network model has been improved.

**Key words:** electric switch mechanism, engine, closed-loop control, neural network, simulation model, adequacy.

БОГАТИР ЮЛІЯ ІВАНІВНА

УДК 625.151.3:004.032.26

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ  
ВИКОНАВЧИМИ ПРИСТРОЯМИ СТАНЦІЙНИХ СИСТЕМ ЗАЛІЗНИЧОЇ  
АВТОМАТИКИ**

05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск



доц. О.Є. Зінченко

---

Підписано до друку «11» травня 2016 р.  
Формат паперу 60x84 1/16. Папір для множних апаратів.  
Умовн. друк. арк. 0,7. Обл.-вид. арк. 0,9.  
Замовлення 165. Тираж 150 прим.

---

Видавництво УкрДУЗТ, свідоцтво ДК №2874 від 12.06.2007 р.  
Друкарня УкрДУЗТ: 61050, м. Харків, майдан Фейербаха, 7.