

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

БЛИНДЮК ВАСИЛЬ СТЕПАНОВИЧ

УДК 629.4.083:629.424.2

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ
ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ
МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

05.22.09 – електротранспорт

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Дніпропетровськ - 2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі електротехніки та електричних машин Української державної академії залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор

Бабасв Михайло Михайлович,

Українська державна академія залізничного транспорту,
завідувач кафедри електротехніки та електричних машин.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Костін Микола Олександрович,

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, професор кафедри електротехніки та електромеханіки;

доктор технічних наук, професор

Сінчук Олег Миколайович,

ДВНЗ «Криворізький національний університет»,
завідувач кафедри систем промислового електроспоживання та електричного транспорту;

доктор технічних наук, професор

Хворост Микола Васильович,

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, завідувач кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності, професор кафедри електричного транспорту.

Захист відбудеться “24” квітня 2014 р. об “14³⁰” годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: ауд. 314, вул. В. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ, 49010.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. В. Лазаряна, 2.

Автореферат розіслано “27” березня 2014 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

д-р техн. наук, доцент

А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. На приміському залізничному транспорті України, найбільшу частину тягових засобів якого складає моторвагонний рухомий склад (МВРС) з тяговим електроприводом постійного струму, рівень покриття експлуатаційних витрат доходами від перевезень становить близько 15 %, тобто витрати перевищують сукупні доходи у 6,5 разу. Тому скорочення експлуатаційних витрат є найважливішим напрямом сучасних досліджень. Одним із шляхів підвищення якості роботи приміського залізничного транспорту є впровадження нових інформаційних технологій й техніко-технологічних рішень, що забезпечать в процесі експлуатації найбільш ефективне використання тягових можливостей МВРС зі зниженням витрат електроенергії і збільшенням тривалості міжремонтного циклу. Вирішення цієї проблеми можливо шляхом застосування ефективних систем керування тяговим електроприводом (ТЕП), що у свою чергу потребує підвищення вимог до процесів керування, збільшення обсягу й швидкості передачі інформації, суттєвого зростання вимог до її вірогідності. Аналіз існуючих у світовій практиці методів та засобів керування ТЕП постійного струму показав, що вони не вирішують в достатній мірі проблему підвищення ефективності використання МВРС. Перспективним способом реалізації зазначених підходів є такий, що передбачає використання у процесі керування ТЕП безперервного моніторингу гранично навантаженого устаткування МВРС. Однак, незважаючи на наявність багатьох досліджень у галузі розроблення технічних засобів регулювання та управління МВРС, наукова проблема впровадження нових методів та моделей прогнозування ефективних параметрів керування ТЕП при додаткових обмеженнях на керування досі не вирішена, а дослідження, що спрямовані на її вирішення, є актуальними.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі електротехніки та електричних машин Української державної академії залізничного транспорту відповідно до планів науково-дослідних робіт академії, що проводяться в межах головних напрямків розвитку науки і техніки:

1. Програми про розвиток фундаментальних досліджень і їх застосування, які прийняті Кабінетом Міністрів на підставі Закону України „Про основи державної політики у сфері науки і науково-прикладної діяльності”.

2. Комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки (затверджена Наказом Міністра транспорту та зв'язку України від 14 жовтня 2008 р. №1259).

3. «Концепції Державної цільової програми впровадження на залізничних коліях швидкісного руху пасажирських поїздів на 2005-2015 рр.», схвалена Постановою Кабінету Міністрів України № 979-р від 31.12.2004 р.

Автор був провідним виконавцем науково-дослідних робіт “Теоретичні основи побудови координатної системи визначення місцезнаходження поїзда на залізничній ділянці” (номер держреєстрації 0106U00411) і “Дослідження та

розробка методів автоматизованого керування рухомим складом залізничного транспорту” (номер держреєстрації 0110U002132).

Мета і задачі дослідження. Метою даної дисертації є вирішення науково-прикладної проблеми підвищення енергетичної ефективності роботи та зменшення експлуатаційних витрат тягових електроприводів моторвагонного рухомого складу.

Для досягнення заданої мети в роботі поставлено такі задачі наукових досліджень:

- провести аналіз вітчизняних і закордонних діючих систем керування рухомим складом та існуючих наукових підходів щодо їхнього удосконалення;
- розробити методи та побудувати математичні моделі, які можуть бути покладені в основу прогнозування процесом керування МВРС, що дасть змогу забезпечити оптимальне виконання графіка руху та підвищити енергоефективність керування;
- розробити методи оцінки ступеня іскріння ТЕД у реальному часі та виконати синтез приймача іскрової компоненти тягового струму, що дозволить урахувати вплив комутаційних процесів при побудові системи керування МВРС;
- розробити методи та моделі прогнозування теплових режимів роботи ТЕД, що дозволить покращити показники температурних режимів управління ТЕП;
- розробити метод керування МВРС з визначенням параметрів керування при додаткових обмеженнях характеристик перехідних динамічних процесів, що дасть змогу знизити електроспоживання при зміні зовнішніх факторів та умов його руху МВРС;
- розробити математичні моделі та виконати моделювання пускових режимів роботи ТЕП МВРС, що дозволить визначити ефективність процесу керування;
- провести оцінку техніко-економічної ефективності впровадження методів керування ТЕП МВРС з урахуванням теплових, комутаційних процесів ТЕД та удосконалених режимів управління.

Об'єкт досліджень – процес керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу.

Предмет досліджень – методи та моделі прогнозування параметрів керування тяговим електроприводом постійного струму моторвагонного рухомого складу.

Наукова новизна роботи полягає у вирішенні науково-прикладної проблеми підвищення енергетичної ефективності роботи та зменшення експлуатаційних витрат ТЕП МВРС шляхом подальшому розвитку методів і моделей прогнозування процесу їхнього керування з урахуванням особливостей роботи і нової форми подання законів управління.

При цьому вперше:

- розроблено метод керування МВРС з ТЕП постійного струму на основі геометричної теорії управління з визначенням параметрів керування при додаткових обмеженнях характеристик перехідних динамічних процесів, що

дає змогу оптимізувати електроспоживання при зміні зовнішніх факторів та умов руху МВРС;

- на основі теорії штучних нейронних мереж запропоновано метод оцінки ступеня іскріння ТЕД та виконано синтез приймача іскрової компоненти тягового струму, що дало змогу урахувати вплив комутаційних процесів при побудові системи керування МВРС;

- розроблено нейродинамічну модель прогнозування теплових режимів роботи ТЕД, що покращило показники температурних режимів управління ТЕП;

- розроблено інтелектуальні методи та засоби керування МВРС на основі нейромережевої асоціативної пам'яті, що забезпечує раціональне виконання графіка руху та підвищує енергоефективність керування.

Удосконалено:

- математичні моделі, які відображають пускові режими роботи МВРС з використанням прямого і зворотного перетворення Фур'є, що підвищує точність оцінки параметрів системи керування.

Знайшли подальший розвиток:

- методи оцінки техніко-економічної ефективності процесу керування ТЕП МВРС з урахуванням теплових, комутаційних процесів ТЕД та удосконалених режимів управління.

Методи дослідження. Обґрунтування підходу до визначення ступеня іскріння за результатами вимірювання живильного струму базується на теорії електричних кіл, теорії електричних машин і теорії диференціальних рівнянь; інтерпретація тягового електродвигуна як тракту поширення іскрового сигналу – на теорії чотириполюсників і спектральної теорії сигналів; синтез ефективного приймача – на теорії ефективного приймання сигналів і на математичній статистиці; визначення ефективних законів керування процесами руху тягового рухомого складу – на основі геометричної теорії керування; обґрунтування методів керування тяговим рухомим складом – на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії; моделювання пускових характеристик тягових електродвигунів – на теорії прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є; моделювання контурів керування тяговим електроприводом – на основі використання пакетів моделювання безперервних систем.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений комплекс моделей дає змогу оптимізувати керування ТЕП постійного струму з урахуванням теплових і комутаційних процесів двигунів. Теоретичне обґрунтування можливості визначення ефективних законів керування МВРС на основі геометричної теорії керування та нейронних мереж адаптивної резонансної теорії дало змогу запропонувати нові методи керування ТЕП. Вірогідність отриманих досліджень підтверджується збіжністю теоретичних результатів і результатів з обробки експериментальних даних, отриманих у ході функціонування розроблених імітаційних моделей. Результати окремих розділів роботи використовуються у навчальному процесі на кафедрі електротехніки та електричних машин і ІППК Української державної академії залізничного транспорту, а також кафедри «Обчислювальна техніка та програмування» НТУ

«ХП». Результати дисертаційної роботи впроваджені в 2011-2012 роках у моторвагонних депо ДП «Південна залізниця», а саме: рекомендації з удосконалення методів керування тяговим електроприводом МВРС з урахуванням обмежень щодо комутації, температури й боксування, методи визначення ефективних законів керування в процесі розгону та руху МВРС. Упровадження вищевказаних розробок дає змогу визначити раціональний швидкісний режим руху електропоїздів, що забезпечує найбільш ефективне використання тягових можливостей електродвигунів.

Особистий внесок здобувача. Усі основні положення і результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно та проводилися в Українській державній академії залізничного транспорту. Автор сформулював мету, задачі досліджень, наукові положення, провів теоретичні та експериментальні дослідження. Крім того, у публікаціях, у яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, здобувачу належать: [2] – розглянуті особливості побудови силової схеми й системи керування тяговим електроприводом дизель – поїзда, [5] – запропоновано для контролю й діагностики систем керування ТЕМ використовувати радіально-базисні нейронні мережі, [6] – проведено аналіз перспектив застосування сучасних інформаційних технологій МВРС, [13] – формалізовано основні параметри щодо реалізації нейромережевої моделі динамічного логічного елемента, [16] – запропоновано з метою універсалізації підходу щодо побудови нейронної мережі та деякого спрощення процедури її навчання ввести обмеження, [17] – проведено синтез ефективних керувань тяговим рухомим складом за допомогою системи керування у формі Бруновського й принципу максимуму Понтрягіна, [18] – запропоновано виявляти зміни характеристик систем управління моторвагонного рухомого складу на основі аналізу таксономічного показника з використанням нейронних мереж, [19] – встановлено, що функціональна придатність моделі обумовлюється значеннями вагових коефіцієнтів та параметрами нахилу функцій збудження кожного нейрона, [20] – запропоновано процедуру реалізації моделі, [22] – сформовано основні методологічні підходи щодо визначення економічної ефективності впровадження системи автоматичного регулювання та управління ТЕМ, [26] – сформовано ряд основних принципів, які покладено в основу підвищення точності обліку і контролю електроенергії вимірювальним комплексом, [27] – сформовано основні методологічні підходи до побудови структури індуктивно-дротового датчика, [28] – запропоновано підходи до формування моделі датчика, [29] - розроблено аналітичну модель для реалізації електронного ключа, [30] – сформовано модель динамічної нейронної мережі з модифікованим алгоритмом навчання, [32] – визначено основні параметри побудови моделей нейронечіткого функціонування автоматизованих систем керування, [35] – запропоновано модель контролю в процесі експлуатації тягового рухомого складу за допомогою нейронних мереж, [36] – сформовано основні методологічні підходи до контролю в процесі експлуатації тягового рухомого складу, [41] – сформовано ряд основних принципів, які покладено в основу аналізу електричних кіл при складних неперіодичних вхідних сигналах,

[42] – формалізовано процедуру оцінки стану рухомого складу за допомогою нейронних мереж.

Усі публікації задовольняють вимоги МОН України.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й отримали схвалення:

1. На 21-26 Міжнародних конференціях «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины» // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008-2013. – м. Алушта.

2. На ХІХ Міжнародній науково-практичній конференції, 1-3 червня 2011 р. – Харків: НТУ «ХП».

3. На 74 Міжнародній науково-технічній конференції кафедр академії, інженерно - технічних працівників залізниць, підприємств і організацій України та інших країн – Харків: УкрДАЗТ, 2012.

4. На ІІІ Міжнародній науково-практичній конференції м. Тель-Авів (Ізраїль). – Луганськ: СУНУ, 2012 // Інноваційні технології на залізничному транспорті.

5. На V Международной научно-практической конференции. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2012 // Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті.

Дисертацію в повному обсязі розглянуто та схвалено на розширеному засіданні кафедри електротехніки та електричних машин УкрДАЗТ (м. Харків); на засіданні ради факультету комп'ютерних та інформаційних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», засіданні міжкафедрального наукового семінару кафедр «Електротехніка та електромеханіка», «Електрорухомий склад», «Електропостачання залізниць», «Автоматика телемеханіка зв'язок», «Електронні обчислювальні машини», «Будівельна механіка» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображено у 42 публікаціях, з них 28 основних, 14 додаткових.

Структура й обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і 5 додатків. Повний обсяг роботи складає 343 сторінки, серед них 69 рисунків за текстом, 9 рисунків на окремих сторінках; 15 таблиць за текстом, 2 таблиці на окремих сторінках; список використаних джерел інформації складається із 390 найменувань на 43 сторінках; 5 додатків на 21 сторінці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, мету та основні задачі досліджень, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача у виконанні дисертаційної роботи. Наведена інформація про структуру дисертації, публікації та апробацію робіт.

У першому розділі проведено аналіз основних етапів впровадження та сучасного стану систем автоматичного керування (АРУ) рухомих складом на залізничному транспорті, показано перспективи їх подальшого розвитку, визначені проблеми, що пов'язані з процесом регулювання та управління тяговим рухомих складом (ТРС).

Значний внесок у розвиток теорії автоматизованих систем керування ТРС, тягових розрахунків, а також у розвиток сучасних систем АРУ ТЕП рухомого складу внесли такі вчені, як: Бабичков А.М., Басов Г.Г., Блохін Є.П., Боднарь Б.Є., Босов А.А., Гетьман Г.К., Грищенко М.А., Гусевський Ю.І., Дмитрієнко В.Д., Ісаєв І.П., Ісмайлов Ш.К., Лісунов В.М., Носков В.І., Нюрнберг В., Маслієв В.Г., Нікіфоров Б.Д., Новіков А.П., Петров Ю.П., Плакс П.В., Платов М.О., Пузанов Н.Я., Розенфельд В.Е., Скалозуб В.В., Сідельников В.М., Сінчук О.М., Тартаковський Е.Д., Хворост М.В., Феоктистов В.П. та ін.

Аналіз попередніх досліджень, присвячених розробці наукових підходів до формування та удосконалення існуючих методів керування тяговим електроприводом постійного струму МВРС, показав, що у своїй більшості вони не приділяють відповідної уваги науковій проблемі розвитку методів та моделей прогнозування ефективних параметрів керування ТЕП при додаткових обмеженнях характеристик перехідних динамічних процесів, обмеженнях на іскріння, зміні зовнішніх факторів, умов руху МВРС, параметрів теплового режиму роботи ТЕД. У розділі визначається, що впровадження удосконалених методів і моделей керування МВРС, які ураховують особливості роботи ТЕП та нові форми подання законів управління, дасть змогу підвищити показники енергоефективності та зменшити експлуатаційні витрати від перевезень у приміському сполученні. Зроблено висновок, що на даний момент, наукова проблема розвитку нових методів та моделей прогнозування ефективних параметрів керування МВРС при додаткових обмеженнях на керування в частині температурних режимів роботи, ступеня іскріння та контролю боксування колісних пар ТЕД досі не вирішена. Вирішення цієї проблеми і складає основний напрям поданої дисертаційної роботи.

У другому розділі розроблено моделі визначення ефективних законів керування процесами руху МВРС. Зважаючи на те, що процес керування ТЕП описується системою нелінійних диференціальних рівнянь, у роботі за допомогою засобів диференціальної геометрії було зроблено перехід в новий простір, де математична модель об'єкта керування залишається еквівалентною вихідній моделі, але стає лінійною. Для цього на основі засобів геометричної теорії керування проведено лінеаризацію математичної моделі ТЕП.

Відома математична модель ТЕП зведена до виду, зручного для розв'язання задач автоматичного регулювання та управління:

$$\frac{di_{\text{я}}}{dt} = \frac{1}{L_{\text{я}}} \left(U_{\text{п}} - (R_{\text{я}} + R_{\text{ш}})i_{\text{я}} - R_{\text{ш}}i_{\text{в}} - C_{\text{Е}}\gamma W n(1 - e^{\beta i_{\text{я}}}) - i_{\text{я}}R_{\text{д}} \right);$$

$$\frac{di_{\text{в}}}{dt} = \frac{1}{L_{\text{в}}} (R_{\text{ш}}i_{\text{я}} - (R_{\text{ш}} + R_{\text{в}})i_{\text{в}}); \quad (1)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\mu}{2\pi m R_{\text{к}}^2} \left(k_1 C_{\text{М}} i_{\text{я}} \gamma W (1 - e^{\beta i_{\text{я}}}) - jmgR_{\text{к}} k_2 \left(a_0 + a_1 \frac{2\pi n R_{\text{к}}}{\mu} + a_2 \frac{\pi^2 n^2 R_{\text{к}}^2}{\mu^2} \right) \right),$$

де $i_{\text{я}}$, $i_{\text{в}}$ – відповідно струм якірної обмотки й струм обмотки збудження; $L_{\text{я}}$, $L_{\text{в}}$ – відповідно індуктивності якірної обмотки й обмотки збудження; $U_{\text{п}}$ – напруга живлення еквівалентного двигуна; $R_{\text{я}}$, $R_{\text{ш}}$, $R_{\text{д}}$, $R_{\text{в}}$ – відповідно активні опори якірного ланцюга, шунта, додаткового резистора й обмотки збудження; $C_{\text{Е}}$, γ , β , $C_{\text{М}}$, k_2 , a_0 , a_1 , a_2 – постійні коефіцієнти; W – число витків обмотки збудження; n – обороти електродвигуна; $\gamma(1 - e^{\beta i_{\text{я}}})$ – аналітичний опис кривої намагнічування; μ – передатне відношення редуктора електродвигуна; m – маса тягового рухомого складу; $R_{\text{к}}$ – радіус колеса колісної пари; k_1 – число двигунів тягового рухомого складу; j – коефіцієнт, що враховує ухил залізничної колії, у загальному випадку залежить від ділянки колії; g – прискорення вільного падіння.

Система рівнянь ТЕП у режимі розгону подана у вигляді:

$$\frac{dx_1}{dt} = a_{10} + a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + a_{131}x_3 e^{\beta x_1} + a_{11u}x_1 u;$$

$$\frac{dx_2}{dt} = a_{21}x_1 + a_{22}x_2; \quad (2)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = a_{30} + a_{31}x_1 + a_{311}x_1 e^{\beta x_1} + a_{33}x_3 + a_{333}x_3^2,$$

де $x_1 = i_{\text{я}}$; $x_2 = i_{\text{в}}$; $x_3 = n$;

$$a_{10} = U_{\text{п}}/L_{\text{я}}; \quad a_{11} = -(R_{\text{я}} + R_{\text{ш}})/L_{\text{я}}; \quad a_{12} = -R_{\text{ш}}/L_{\text{я}}; \quad a_{13} = -C_{\text{Е}}\gamma W/L_{\text{я}};$$

$$a_{131} = C_{\text{Е}}\gamma W/L_{\text{я}}; \quad a_{11u} = -1/L_{\text{я}}; \quad a_{21} = R_{\text{ш}}/L_{\text{в}}; \quad a_{22} = -(R_{\text{ш}} + R_{\text{в}})/L_{\text{в}};$$

$$a_{30} = -jmgR_{\text{к}} k_2 a_0; \quad a_{31} = \mu k_1 C_{\text{М}} \gamma W / 2\pi m R_{\text{к}}^2; \quad a_{33} = -jmgR_{\text{к}}^2 k_2 a_1 \frac{2\pi}{\mu};$$

$$a_{311} = -\mu k_1 C_{\text{М}} \gamma W / 2\pi m R_{\text{к}}^2 = -a_{31}; \quad a_{333} = -jmgR_{\text{к}}^3 k_1 a_2 \frac{\pi^2}{\mu^2}.$$

Геометрична теорія керування припускає, що необхідною й достатньою умовою лінеаризації зворотним зв'язком за станом у деякій частині Ω початку координат математичної моделі нелінійного об'єкта керування, описуваного системою з n звичайних диференціальних рівнянь, є наявність у Ω матриці керованості $G = \left| Y, L_X Y, \dots, L_X Y^{n-2}, L_X Y^{n-1} \right|$ рангу n ($\det G$ може перетворюватися в нуль на початку координат) й інволютивної множини $\{Y, L_X Y, \dots, L_X Y^{n-2}, L_X Y\}$, складеної з перших $(n-1)$ стовпців матриці G . Тут X, Y – векторні поля, пов'язані з лінеаризованою системою диференціальних рівнянь; $L_X Y$ – похідна Лі векторного поля Y уздовж векторного поля X ; $L_X^{n-2} Y, L_X^{n-1} Y$ – похідні Лі $(n-2)$ -го й $(n-1)$ -го порядків поля Y уздовж векторного поля X .

Визначення похідної Лі скалярної гладкої функції $\varphi(x)$ векторного аргументу ($\varphi: R^n \rightarrow R$) по гладкій векторній функції $g = g(x)$ визначається співвідношенням:

$$L_g \varphi = \frac{d\alpha}{dx} = \nabla \alpha g = \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right) \alpha g = \sum_{k=1}^n \frac{\partial \alpha}{\partial x_k} g_k,$$

$$\text{де } g = (g_1, g_2, \dots, g_n); \quad x = (x_1, x_2, \dots, x_n); \quad \nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x_1}, \frac{\partial}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} \right).$$

Похідні Лі другого й більш високих порядків визначаються рекурсивно:

$$L_g^k \varphi = L_g (L_g^{k-1} \varphi), \quad k = 2, 3, \dots$$

Похідна Лі нульового порядку скалярної функції φ є сама ця функція

З умови лінеаризації нелінійного об'єкта керування випливає, що для лінеаризації системи рівнянь (2) зворотним зв'язком у просторі «вхід-стан» необхідно, щоб дужки Лі від двох перших стовпців матриці керованості $G = \left| Y, L_X Y, L_X^2 Y \right|$ дорівнювали нулю при ранзі матриці керованості, рівному трьом. Безпосередня перевірка рангу матриці керованості показала, що він рівний трьом, а дужки Лі $[Y_1, L_{X_1} Y_1]$ рівні нулю, оскільки перші два стовпці матриці G є постійними. Таким чином, виконуються необхідні й достатні умови для перетворення системи рівнянь (2) до лінійного виду у формі Бруновського:

$$\begin{aligned} \frac{dz_1}{dt} &= z_2; \\ \frac{dz_2}{dt} &= z_3; \\ \frac{dz_3}{dt} &= v, \end{aligned} \tag{3}$$

де z_1, z_2, z_3, v – змінні й керування в просторі «вхід – стан».

У цьому випадку існують функції $T_i(x_1, x_2, x_3), i = \overline{1,3}$, за допомогою яких здійснюється перехід від змінних x_i до змінних $z_i (i = \overline{1,3})$:

$$z_i = T_i(x_1, x_2, x_3), i = \overline{1,3}$$

Отримана система рівнянь дає змогу визначати ефективні закони керування МВРС при вирішенні трьох різних завдань регулювання та управління рухом, а саме:

1. Визначення максимальної швидкодії керування, що розглянуто як завдання досягнення максимальної швидкості за мінімальний час при реостатному керуванні додатковим опором R_D та реалізовано шляхом використання принципу максимуму Понтрягіна. При цьому у вихідній системі рівнянь (2) обороти еквівалентного електродвигуна, а, отже, і швидкість руху тягового рухомого складу визначаються в результаті інтегрування третього диференціального рівняння. У системі рівнянь (3) змінної, яка прямо відповідає швидкості руху МВРС, немає. Однак змінна z_1 визначається співвідношенням (4)

$$z_1 = x_3 - \frac{b_{31}}{b_{21}} x_2, \quad (4)$$

де x_3 – обороти електродвигуна, пропорційні швидкості V руху тягового рухомого складу

$$V = \frac{2\pi x_3}{\mu} R_K;$$

де μ – передатне відношення редуктора електродвигуна; R_K – радіус колеса колісної пари; b_{31}, b_{21} – постійні коефіцієнти; x_2 – струм збудження.

У процесі розгону МВРС струм збудження змінюється не більш ніж на 20 %, тому в першому наближенні можна вважати, що змінна z_1 у системі рівнянь моделює швидкість руху складу. Тому при розв'язанні завдання максимальної швидкодії необхідно досягти максимальної швидкості V_{max} за мінімальний час при керуванні опором R_D .

З вигляду системи диференціальних рівнянь (3) у формі Бруновського й необхідності досягнення максимального значення змінної z_1 випливає, що керування v у початковий момент руху повинне набувати максимального значення й залишатися таким до кінця інтервалу керування, однак максимальне значення керування v (або мінімальне значення опору R_D) залежить від струму якоря, тому в кожний момент процесу розгону величина керування (величина опору R_D) визначається співвідношенням

$$v = v_{max}(I_{Я})$$

або

$$R_{Д} = R_{Дmin}(I_{Я}),$$

де $v_{max}(I_{Я})$ – максимально можливе керування при заданому значенні струму якоря;

$R_{Дmin}(I_{Я})$ – мінімально можливе значення опору при заданому значенні струму якоря.

Таким чином, розв'язання завдання максимальної швидкодії в цьому випадку тривіальне й визначається в кожний момент часу гранично більшим керуванням v (або гранично малим значенням опору $R_{Д}$), обмеженим максимально допустимим струмом якоря.

2. Визначення ефективних законів керування в процесі розгону МВРС при додаткових обмеженнях.

При керуванні ТЕП важлива не тільки швидкість руху МВРС, але й відстань, яку він проходить за час керування. Тому введемо додаткову умову, що враховує цю вимогу:

$$S = \int_{t_0}^{t_1} V dt = \int_{t_0}^{t_1} qz_1 dt = l_{max}, \quad (5)$$

де S – відстань, яку проходить рухомий склад за час розгону від початкового пункту руху; V – швидкість руху поїзда, $V(t_0) = 0$, $V(t_1) = V_{max}$; q – постійний коефіцієнт; l_{max} – максимальна відстань, яку повинен пройти поїзд за інтервал часу розгону $[t_0, t_1]$.

Одержимо нову модель керування МВРС:

$$\begin{aligned} \frac{dy_1}{dt} &= q y_2; \\ \frac{dy_k}{dt} &= y_{k+1}, \quad k = 2, 3; \\ \frac{dy_4}{dt} &= v_1. \end{aligned} \quad (6)$$

У розглянутому вище завданні максимальної швидкодії не враховувалися енергетичні витрати на здійснення розгону МВРС. Для обліку цих витрат уведемо в мінімізований функціонал, крім часу, й квадрат керування

$$J = \int_{t_0}^{t_1} (1 + b \varphi(v_1^2)) dt,$$

де b – ваговий коефіцієнт.

Основні співвідношення принципу максимуму для об'єкта керування (6) такі:

$$H(y_j(t), \Psi_j(t), v_1) = \Psi_1 q y_2 + \Psi_2 y_3 + \Psi_3 y_4 + \Psi_4 v_1 + (1 + b \varphi(v_1^2)) \Psi_0, j = \overline{0, 4};$$

$$H(y_j(t), \Psi_j(t), v_1) = \max_{v_1 \in G} (H(y_j(t), \Psi_j(t), v)), j = \overline{0, 4};$$

$$\frac{dy_j}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \Psi_j}; y_j(t_0) = 0, j = \overline{0, 4};$$

$$\frac{d\Psi_j}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial y_j}; \Psi_j(t_1) = \Psi_{j_1}, j = \overline{0, 4},$$

де G – область допустимих керувань, що задається інтервалом $[v_{1\min}, v_{1\max}]$;

$y_j(t_0), j = \overline{0, 4}$ – значення фазових координат у початковий момент часу;

$\Psi_j(t_1), j = \overline{0, 4}$ – значення спряжених змінних у кінцевий момент інтервалу керування.

3. Розв'язання завдання розгону тягового рухомого складу при обмеженнях на витрату керування й перехідні динамічні процеси.

Система рівнянь в цьому завданні має вигляд

$$\frac{dz_1}{dt} = z_2;$$

$$\frac{dz_2}{dt} = z_3;$$

$$\frac{dz_3}{dt} = v.$$

При цьому потрібно визначити керування v , на яке накладено обмеження $v_{\min} \leq v \leq v_{\max}$, що мінімізує функціонал

$$J = \int_{t_0}^{t_1} (1 + b_0(z_{30} - z_3(t))^2 + b_1 v^2) dt, \quad (7)$$

де b_0, b_1, z_{30} – константи, при розгоні тягового рухомого складу з початкового стану $z_j = 0, j = \overline{1, 3}$ у кінцевий стан, у якому $z_1 = z_{1\max}(t_1)$, а на змінні z_2 і z_3 обмеження не задані.

Основні співвідношення принципу максимуму для об'єкта керування (4) і функціонала (7) мають вигляд

$$H(z_j(t), \Psi_j(t), v) = \Psi_1 z_2 + \Psi_2 z_3 + \Psi_3 v + \Psi_0 [1 + b_0 (z_{30} - z_3(t))^2 + b_1 v^2], j = \overline{0, 3}; \quad (8)$$

$$H(z_j(t), \Psi_j(t), v) = \max_{v \in G} (H(z_j(t), \Psi_j(t), v)), j = \overline{0, 3}; \quad (9)$$

$$\frac{dz_j}{dt} = \frac{\partial H}{\partial \Psi_j}; z_j(t_0) = 0, j = \overline{0, 3}; \quad (10)$$

$$\frac{d\Psi_j}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial z_j}; \Psi_j(t_1) = \Psi_{j_1}, j = \overline{0, 3}; \quad (11)$$

де G – область допустимих керувань, що задається інтервалом $[v_{\min}, v_{\max}]$;

$z_j(t_0), j = \overline{0, 3}$ – значення фазових координат у початковий момент часу;

$\Psi_j(t_1), j = \overline{0, 3}$ – значення спряжених змінних у кінцевий момент інтервалу керування.

Таким чином, лінеаризація математичної моделі ТЕП дала змогу сформулювати необхідні завдання ефективного управління електроприводом МВРС. Перевірку адекватності розглянутих моделей та визначення похибки моделювання розглянуто у подальших розділах дисертації.

У третьому розділі розглянуто методи аналізу та побудовано моделі впливу комутаційних процесів на часову структуру струму живлення ТЕД.

Взаємопов'язаність електромагнітних процесів у ТЕД дає підстави вважати, що явища, які мають місце на поверхнях контакту щіток із колектором (перш за все – іскріння), створюють у струмі живлення специфічні складові, які містять інформацію як про ці явища, так і про характер комутації окремих секцій або їх груп.

Відомо, що часова залежність іскрового струму, що протікає на першій з цих стадій, є такою:

$$i(t) = i_0 \cdot e^{\alpha d} \left[\frac{\mu_1}{\mu_1 - 1} \cdot \exp\left(\frac{\mu_1 - 1}{\mu_1} \cdot \frac{t}{\tau}\right) - \frac{1}{\mu_1 - 1} \right],$$

де i_0 – початковий «затравочний» струм; α – іонізаційний коефіцієнт Таунсенда;

d – ширина іскрового проміжку; μ_1 – коефіцієнт репродукування електронів;

τ – час витягування іонів від анода до катода.

Вираз для $i(t)$ описує струм тільки на початковій ділянці іскрового імпульсу, тобто описує передній фронт цього імпульсу. Біля вершини частина та спад іскрового імпульсу, як впливає з фізичної картини, повинні являти собою добре відому з теорії перехідних процесів експоненціальну струмову криву. Цей висновок підтверджують як типова форма струму імпульсного розряду пристроїв захисту від перенапружень, так і результати сучасних досліджень. Оскільки t є малим, то можна записати таку наближену рівність:

$$i(t) \approx i_0 e^{\alpha t} \left[\frac{\mu_1}{\mu_1 - 1} \left(1 + \frac{\mu_1 - 1}{\mu_1} \cdot \frac{t}{\tau} \right) - \frac{1}{\mu_1 - 1} \right] = i_0 e^{\alpha t} \left(1 + \frac{t}{\tau} \right).$$

Застосовуючи для опису спаду імпульсу множник $e^{-\gamma t}$, де γ – деяка стала, що підлягає подальшому вимірюванню, приходимо до такого виразу для іскрового струму:

$$J(t) = \left[i_0 e^{\alpha t} \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) \right] e^{-\gamma t}, \quad t \geq 0. \quad (12)$$

Скористаємось позначенням $A = \frac{i_0 e^{\alpha t}}{\tau}$. Фізичним сенсом величини A є швидкість зростання струму в момент настання пробою. Далі будемо розглядати цю величину як параметр струмового імпульсу, який підлягає подальшому вимірюванню.

Шуканий струм знаходимо як обернене перетворення Фур'є від його спектральної щільності:

$$i(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \underline{S}_J(\omega) \cdot \underline{K}_I(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega. \quad (13)$$

Після перетворювань отримаємо такий вираз для вихідного струму $i(t)$:

$$i(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ A \frac{a_1}{b_1} t \cdot e^{-\gamma t} & \text{при } 0 \leq t < b_1/b_0, \\ A \left[\frac{a_1}{b_1} + e^{\gamma \frac{b_1}{b_0}} \left(\frac{a_0}{b_0} - \frac{a_1}{b_1} \right) \right] t \cdot e^{-\gamma t} - A e^{\gamma \frac{b_1}{b_0}} \left(\frac{a_0 b_1}{b_0^2} - \frac{a_1 b_1}{b_0 b_1} \right) \cdot e^{-\gamma t}. & \end{cases} \quad (14)$$

Амплітуда іскрового струму й енергія, яка виділяється ним у даній зоні, служать однозначною мірою ступеня іскріння. Амплітуда іскрового імпульсу струму, описуваного моделлю (12), рівна $A/(\gamma e)$, а енергія, яка виділяється цим струмом, пропорційна величині A^2/γ^3 . Отже, числові значення параметрів A і γ однозначно визначають ступінь іскріння одиночної щітки. Тому становить практичний інтерес вимір їх величин за результатами спостереження іскрового компонента струму, що протікає через джерело живлення. На практиці це спостереження принципово здійсненне шляхом виміру величини, створюваної зазначеним компонентом напруги $u(t)$ на виході вимірювального трансформатора, первинна обмотка якого ввімкнена послідовно із двигуном і джерелом живлення. Ця напруга пов'язана зі струмом співвідношенням $u(t) = M \frac{di(t)}{dt}$, у якому величину взаємної індуктивності будемо вважати відомою. Таке підключення одночасно забезпечує й автоматичне усунення постійного тягового струму з результатів спостереження. З метою синтезу приймача іскрової компоненти струму ТЕД у третьому розділі були розроблені математичні моделі інформаційних параметрів A і γ .

$$\gamma = \frac{2 \sum_{k=0}^{K-1} u_k t_k - 2MF_1 \sum_{k=0}^{K-1} t_k - 4MF_2 \sum_{k=0}^{K-1} t_k^2}{\sum_{k=0}^{K-1} u_k t_k - MF_1 \sum_{k=0}^{K-1} t_k^2 - 2MF_2 \sum_{k=0}^{K-1} t_k^3}. \quad (15)$$

$$A = \frac{\sum_{k=0}^{K-1} u_k}{M\gamma \frac{a_1}{b_1} \sum_{k=0}^{K-1} t_k} - \frac{2 \left(\sum_{k=0}^{K-1} u_k t_k - MF_1 \sum_{k=0}^{K-1} t_k - MF_2 \sum_{k=0}^{K-1} t_k^2 \right)}{M \frac{a_1}{b_1} \sum_{k=0}^{K-1} t_k} - \frac{KM F_1}{M\gamma \frac{a_1}{b_1} \sum_{k=0}^{K-1} t_k} - \frac{MF_2}{M\gamma \frac{a_1}{b_1}}. \quad (16)$$

Отримані вирази являють собою шукані оцінки величин A і γ методом максимальної правдоподібності (зведеним в цьому випадку до методу найменших квадратів), отримані за результатами вимірів напруги $u(t)$ на часовому інтервалі $[0, b_1/b_0)$, де розташований початковий фрагмент кривої іскрового струму. При цьому величини F_1 й F_2 визначені тільки результатами спостережень. Вирази (15) і (16), власне, і задають функціональні зв'язки між величинами оцінок, часовими відліками вхідного сигналу й константами

a_1, b_1, K, M й Δt . Ці зв'язки відображає верхня частина структурної схеми, зображеної на рис.1 (часову й амплітудну дискретизацію здійснює аналого-цифровий перетворювач АЦП).

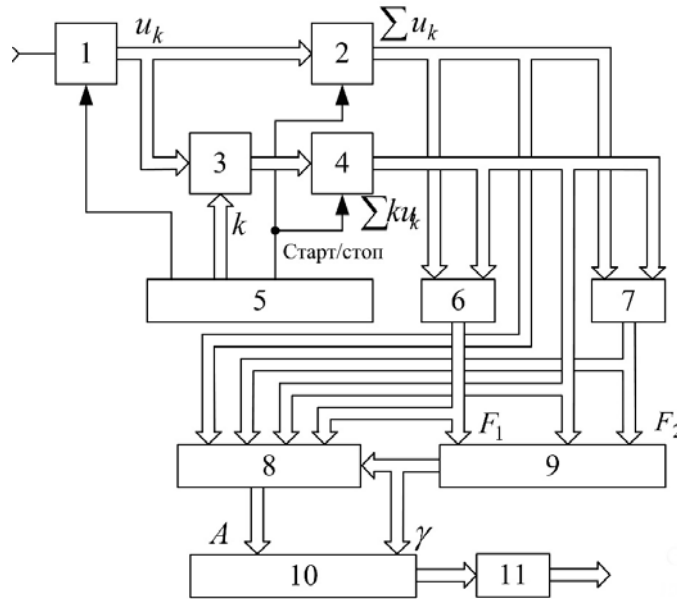


Рисунок 1 – Структурна схема приймача іскрової компоненти струму тягового двигуна:

1 – АЦП; 2, 4 – суматор; 3 – перемножник; 5 – блок керування й зберігання констант; 6 – обчислювач F_1 ; 7 – обчислювач F_2 ; 8 – обчислювач A ; 9 – обчислювач γ ; 10 – обчислювач амплітуди струмового імпульсу $I_{\max} = \frac{A}{\gamma e}$; 11 – схема перерахування

Нижні два блоки забезпечують відповідно обчислення амплітуди іскрового імпульсу струму між щіткою й пластиною колектора і її перерахування в нормативний ступінь іскріння. При реалізації приймача стосовно до конкретного двигуна необхідне калібрування схеми перерахування.

Можлива реалізація суматора, що здійснює операцію $\sum_{k=0}^{K-1} u_k$, і пари

«перемножник-суматор», яка здійснює операцію $\sum_{k=0}^{K-1} ku_k$, у вигляді обладнань

ковзного в часі обчислення на базі лінії затримки зі зваженими відводами, або, іншими словами, у вигляді нерекурсивного фільтра. З практичної точки зору такий варіант може виявитися більш переважним, тому що в ньому за рахунок деякого ускладнення схеми різко знижені вимоги до швидкодії процесора й відкривається можливість використання сучасних процесорів паралельної архітектури.

Для моделювання впливу іскріння на змінну складову тягового струму $\mathbf{s}(t)$ розроблена динамічна модель пристрою оцінки ступеня іскріння ТЕД. Сигнал $\mathbf{s}(t)$ можна подати у вигляді множини, яка містить сукупність поодиноких іскор $A_k s_{ons}(t_k)$, що виникають в деякі моменти часу t_k і відрізняються амплітудою A_k

$$\overline{\mathbf{s}(t)} = \{A_1 s_{ons}(t_1), A_2 s_{ons}(t_2), \dots, A_k s_{ons}(t_k)\}. \quad (17)$$

Функціонування пристрою оцінки ступеня іскріння на колекторі ТЕД зводиться до виявлення наявності іскри та розрахунку їх кількості за проміжок часу Δt . Слід зазначити, що одним з відомих засобів виявлення апріорно відомого (еталонного) сигналу у вхідному є метод кореляційного прийому. Тоді, перейшовши до дискретних сигналів, які отримуються з АЦП приймача (рис.1), і застосувавши розрахунки коефіцієнта кореляції Пірсона для кожного дискретного моменту часу t_i , маємо

$$r(t_i) = \frac{\sum [s(t_{i-K}) - \frac{1}{K} \sum_{j=i-K}^K s(t_j)] [s_{ons}(z_{i-K}) - \frac{1}{K} \sum_{j=i-K}^K s_{ons}(z_j)]}{\sqrt{\sum [s(t_{i-K}) - \frac{1}{K} \sum_{j=i-K}^K s(t_j)]^2 \sum [s_{ons}(z_{i-K}) - \frac{1}{K} \sum_{j=i-K}^K s_{ons}(z_j)]^2}}, \quad (18)$$

де $s_{ons}(z_i)$ – дискретний еталонний сигнал поодинокі іскри; K – кількість його значень.

Враховуючи частоту дискретизації АЦП $F_d = 22,1$ (кГц) та тривалість коливального процесу $s_{ons}(z_i)$ приблизно 1 мс, кількість значень $K = 22$.

При застосуванні нейромережевого елемента вираз 17 перетвориться на такий:

$$S^{HM}(\Delta t) = \begin{cases} 1, & \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_1}\right) = 1 \\ 1^{1/4}, & \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_1 \cdot 1/4}\right) - \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_2}\right) = 1 \\ 1^{1/2}, & \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_1 \cdot 1/2}\right) - \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_1 \cdot 1/4}\right) = 1 \\ 2, & \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_2}\right) - \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_1 \cdot 1/2}\right) = 1 \\ 3, & \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_2}\right) - \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_2}\right) = 1 \end{cases} \quad (19)$$

Якщо різниця між вихідними значеннями елемента дорівнює одиниці, то значення $S^{HM}(\Delta t)$ відповідає поточному класу комутації. При цьому на вході - відповідна кількість іскор за проміжок часу Δt , приведена до значення нульової компоненти спектра $S[0](\Delta t)$. Функціонування моделі оцінки ступеня іскріння на колекторі ТЕД, при порогових значеннях нульової компоненти спектра:

$N'_1 = 50, N'_{1\frac{1}{4}} = 100, N'_{1\frac{1}{2}} = 250, N'_2 = 450, N'_3 = 1100$, наведено на рис. 2.

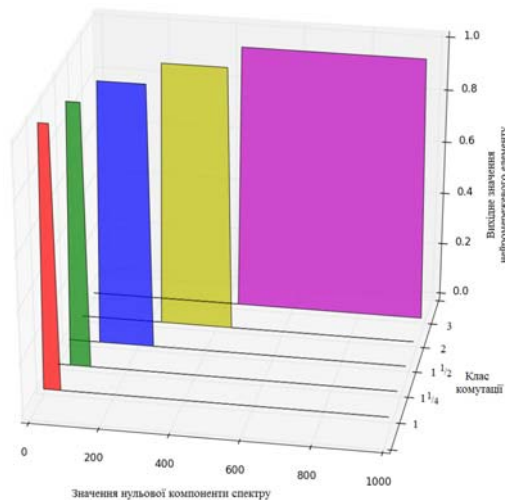


Рисунок 2 – Результати функціонування моделі в залежності від значення нульової компоненти спектра

З урахуванням розроблених моделей пристрій оцінки ступеня іскріння на колекторі ТЕД функціонує наступним чином. Після перетворення вхідного сигналу до цифрової форми (АЦП) виконується перетворення Фур'є. Абсолютне значення реальної частини нульової компоненти надходить до нейромережевого елемента, який виконує класифікацію відповідно до виразу (19), і отримується поточне значення ступеня іскріння. Якщо вона має значення **1** або **1^{1/4}**, то функціонує кореляційна модель (18), що виконує аналіз за кожним випадком виникнення поодинокі іскри.

У четвертому розділі проведено дослідження загальної прогнозної моделі теплового стану ТЕД. Функціональна структура прогнозної моделі МВРС (рис.3) повинна включати датчики первинної інформації: швидкості руху (ШР); поточного значення струму (ПС); температури ТЕД (Т), які відповідно формують у дискретні моменти часу t сигнали: $f_{ШР}(t)$, $f_{ПС}(t)$ та $f_T(t)$. У свою чергу, АРУ ТРС може посилати запит до загальної прогнозної моделі $U(t,i,v)$ на формування вихідного сигналу, який містить дані з можливої температури ТЕД на прогнозований момент часу при відповідному струмі та швидкості руху. Автоматизована система враховує можливі значення перевищення температури при формуванні керуючого рішення $K(t)$.

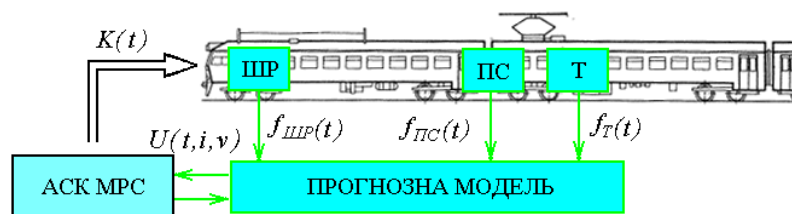


Рисунок 3 – Функціональна структура загальної прогнозної моделі

Реалізація такої функціональності в загальній прогнозній моделі повинна містити наступні складові: актуальну модель поточного стану $U(t_0, i, v)$; прогнозу модель $U(t_n, i, v)$; модель попередніх станів $U(t_{-n}, i, v)$, тобто

$$U(t, i, v) = \begin{cases} U(t_0, i, v) \\ U(t_n, i, v) \\ U(t_{-n}, i, v) \end{cases}, \quad (20)$$

де $t = 1, 2, \dots, N$ - дискретні моменти часу.

З метою мінімізації похибки моделі $U(t_0, i, v)$ необхідно врахувати особливості конкретного ТЕД, вплив зовнішніх та внутрішніх факторів, які виникають в процесі руху. У зв'язку з цим передбачається наступний процес функціонування загальної прогнозної моделі в часі (рис. 4).

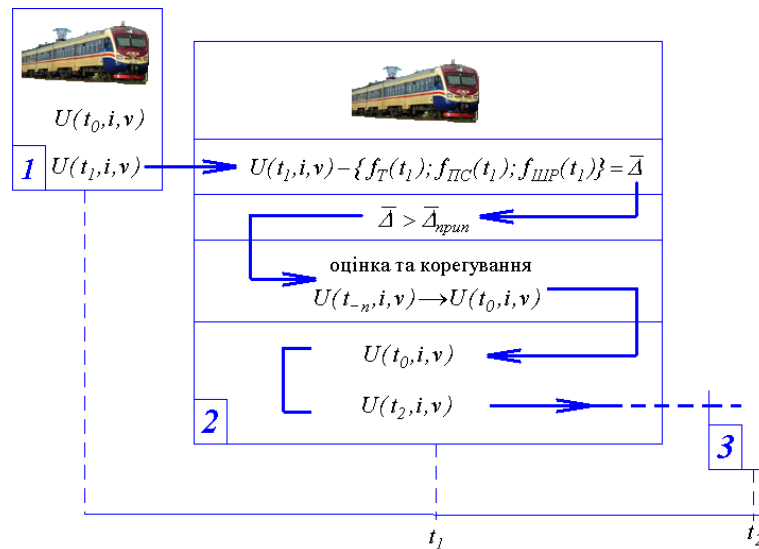


Рисунок 4 – Функціонування загальної прогнозної моделі теплового стану ТЕД

У початковий момент часу функціонують поточна та прогнозна моделі, причому на основі останньої розраховується значення температури ТЕД в наступний момент часу t_1 . Під час руху поїзда фіксуються значення $f_{ШР}(t)$, $f_{ПС}(t)$ та $f_T(t)$. В момент часу $t=t_1$ виконується порівняння результату функціонування прогнозної моделі на попередньому етапі з поточними значеннями

$$U(t_1, i, v) - \{f_T(t_1); f_{ПС}(t_1); f_{ШР}(t_1)\} = \bar{\Delta}, \quad (21)$$

де $\bar{\Delta}$ – отримана функціональна похибка моделі.

Якщо $\bar{\Delta} > \bar{\Delta}_{прин}$, тобто похибка перевищує припустимий рівень, виконується корегування поточної моделі за результатами функціонування моделі попередніх станів. Після цього виконується прогноз на наступний

момент часу. В будь-який момент часу система АСК МВРС може виконати запит до загальної моделі на отримання прогнозу при визначених варіантах t, i, v . У зв'язку з тим, що модель має враховувати попередній стан і функціонує у реальному часі, застосовано динамічну нейронну мережу (НМ) типу NARX з модифікованим алгоритмом навчання за методом зворотного поширення помилки. Взнявши до уваги те, що припустимий діапазон вхідних та вихідних значень мережі – $[0, 1]$, введемо коефіцієнти k_c та k_T – коефіцієнт струму й температури відповідно. Крім цього, вважаємо, що ТЕД із самовентиляцією має лінійну залежність між швидкістю обертання (швидкістю руху поїзда) та тепловіддаванням, тоді

$$U(t, i, v) = k_T \text{NARX}\left(\frac{i}{k_c}, t\right) - \begin{cases} k_{III} v(t), & \text{якщо } T > T_{н.с.} \\ T_{н.с.} & \end{cases}, \quad (22)$$

де k_{III} – коефіцієнт швидкості; $T_{н.с.}$ – температура навколишнього середовища; $v(t)$ – швидкість руху МВРС.

Перша складова виразу (22) – результат функціонування динамічної нейронної мережі типу NARX (рис. 6), яка приймає на вході приведені значення струму i та розраховує абсолютне значення температури ТЕД, друга складова враховує вплив швидкості руху ТЕП на процес охолодження двигуна внаслідок самовентиляції. Як відомо, для функціонування нейронної мережі потрібно виконати її попереднє навчання на апріорно відомій послідовності, яка складається з пар значень: вхід – вихід. У свою чергу, для динамічної НМ ця послідовність повинна бути розгорнута в часі. Для ТЕД 1ДТ.0012 вважаємо, що максимальний робочий струм складає 400 А, максимальна температура – 300°C (без урахування охолодження). Тоді первинна навчальна послідовність у вигляді пар: вхідний струм $i(t)$ – вихідна температура $T(t)$, яку розгорнуто за вісімнадцятьма дискретними значеннями часу, подана на рис. 5 у вигляді безперервної функції

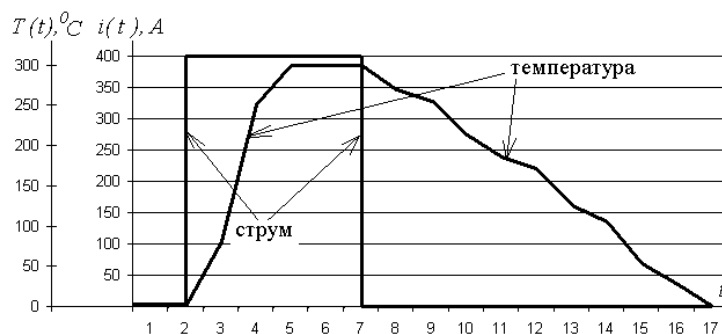


Рисунок 5 – Первинна навчальна послідовність нейронної мережі типу NARX

Вибір структури нейронної мережі NARX (рис. 6) здійснюємо таким чином. Спочатку обираємо мінімальну конфігурацію (з одним зворотним зв'язком за входом та одним – за виходом, трьома нейронами в першому та

другому шарі) і виконуємо її навчання. Якщо отримується неприпустиме значення середньоквадратичної енергії помилки за виходом, то ускладнюємо структуру до отримання задовільного значення. Для мережі з мінімальною структурою процес навчання складався з 1000 ітерацій глобального циклу.

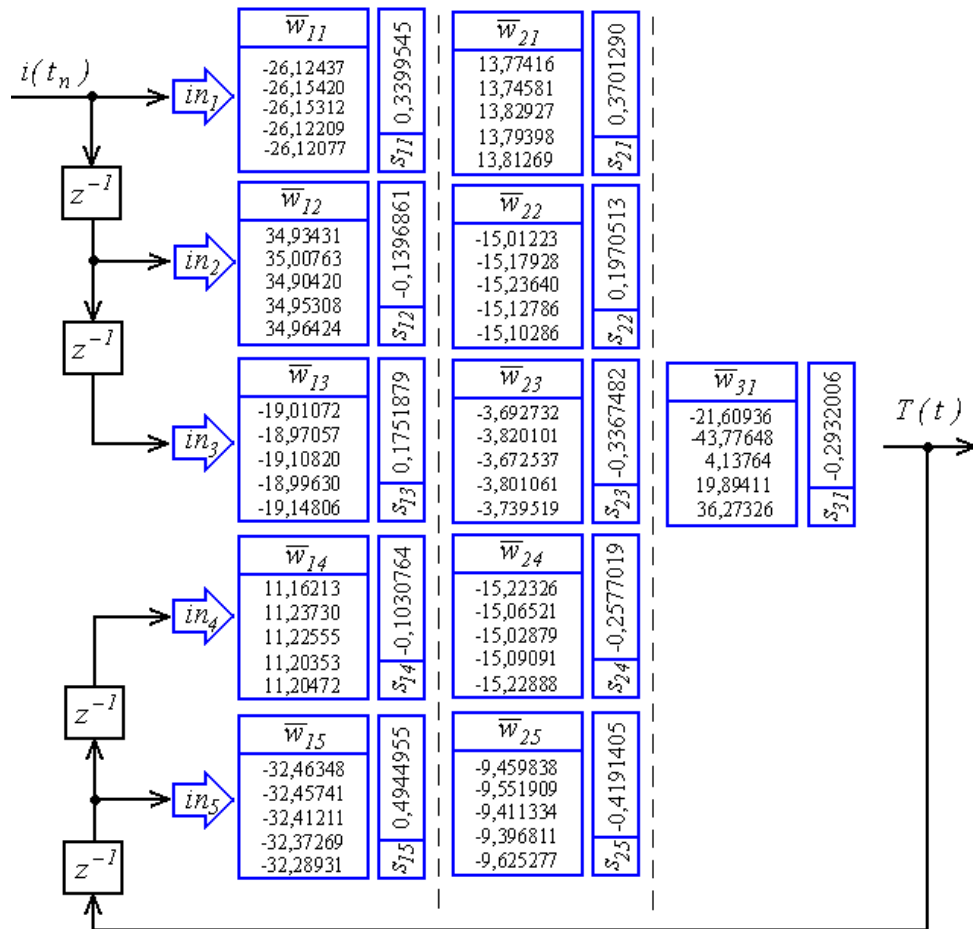


Рисунок 6 – Структура мережі NARX з розрахованими значеннями векторів вагових коефіцієнтів \bar{w}_{ij} та параметрів нахилів функцій активації нейронів s_{ij}

Початкові умови функціонування загальної прогнозувальної моделі теплового стану ТЕД: $f(t_0) = T(t_0) = T_{н.с.} = 20 (^{\circ}C)$, $f_{ШР}(t_0) = v(t_0) = 0 (км / год)$, $f_{ПС}(t_0) = i(t_0) = 0 (A)$.

При рушанні моторвагонної одиниці з місця (момент часу t_p) значення тягового струму дорівнює 175 А, яке потім зменшується внаслідок зростання швидкості руху та автоматичного переходу ТЕД на інші реостатні характеристики. В моменти часу t_{e1} та t_{e2} струм припиняється, МВРС переходить у режим вибігу. Результати функціонування моделі у вигляді графіка зміни розрахованої температури $T(t)$ залежно від $v(t)$ та $i(t)$ наведено на рис. 7.

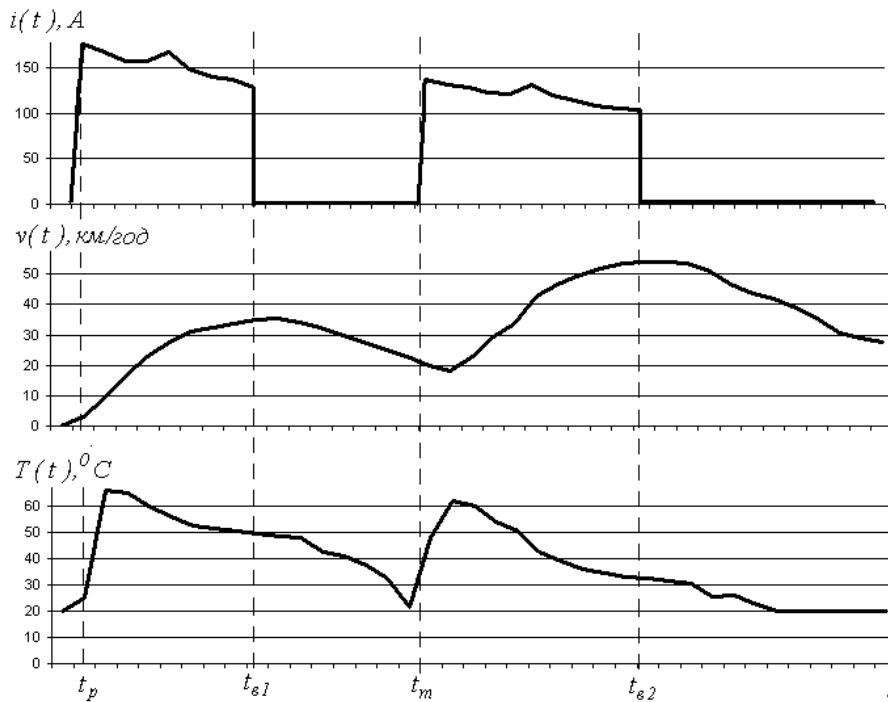


Рисунок 7 – Результати функціонування поточної моделі $U(t_0, i, v)$

Як показали дослідження, застосування мережі NARX з двома парами ліній затримок задовольняє висунуті вимоги як за формою вихідного сигналу, так і за отриманим значенням помилки $E(t_N)_{min} = 0,104069$.

Ефективність системи керування МВРС залежить від спроможності автоматизованої системи керування до адекватної оцінки впливу факторів, які діють на МВРС у процесі руху.

Слід зазначити, що в більшості МВРС, які перебувають в експлуатації, застосовуються компоненти контролю та регулювання струму ТЕП застарілих типів. У зв'язку з цим постає питання синтезу відповідних функціональних моделей, у першу чергу орієнтованих на інтерпретацію даних, які відображають режими роботи ТЕП. На підставі цього у четвертому розділі було поставлено задачу – розробити модель контролю юза або боксовання колісних пар у візку моторного вагона МВРС. Відомо, що в МВРС, які перебувають в експлуатації, поріг спрацювання схеми захисту від боксовання або юза (ϑ_{max}) встановлюється апріорно за значенням міжколекторної напруги двох ТЕД, які включені за мостовою схемою, завдяки застосуванню реле боксовання. Використання цього дискретного елемента суттєво обмежує функціональні можливості пристрою керування струмом ТЕП та потребує регулювання як за значенням порогу спрацювання, так і відключення. З урахуванням цього, при розробленні системи контролю юза або боксовання колісних пар доцільно застосовувати більш гнучкий математичний апарат моделювання, який спроможний адаптуватися до конкретних умов функціонування, – методи та засоби теорії нейронних мереж. При цьому доцільно орієнтуватися на динамічну нейромережеву модель елемента, в структуру якої слід ввести два входи.

В роботі контроль наявності боксування колісних пар здійснює нейромережева модель, яка дозволяє провести оцінку різниці тягових струмів (НМ ОРТС) у складі пристрою керування двома ТЕП.

При введенні умов функціонування моделі НМ ОРТС та обмежень розглядаються два окремих періоди роботи:

1. Первинний – при цьому виконується навчання НМ на апріорно відомих даних без урахування специфічних особливостей кожного з пари ТЕП на візку.

2. Робочий – постійна перевірка актуальності моделі, її оцінка та донавчання нейромережевої моделі у разі виникнення потреби.

З урахуванням необхідного діапазону вихідних значень $[-1, 1]$ у НМ ОРТС обираємо функцію збудження нейронів – гіперболічний тангенс:

$$y_i = th(v_j), \quad (23)$$

де v_j – індуковане локальне поле нейрона (вагова сума всіх синаптичних входів та порогових значень); y_j – вихід j -го нейрона.

З урахуванням схованих шарів модель функціонування при прямому розповсюдженні сигналів набуває такого вигляду:

$$y_{kj} = th\left(1 + \sum_{i=1}^{N_k} y_{ki} \cdot w_{kij}\right), \quad (24)$$

де w_{kij} – відповідний ваговий коефіцієнт; N_k – кількість нейронів у k -тому шарі (для першого шару $y_{ki} = I_i$).

Для навчання використовуємо процедуру зворотного поширення помилки. Корегування вагових коефіцієнтів шару l нейронної мережі виконується відповідно до загального дельта-правила:

$$w_{ji}^{(l)}(n+1) = w_{ji}^{(l)}(n) + a[w_{ji}^{(l)}(n-1)] + \eta \delta_j^{(l)}(n) y_j^{(l-1)}(n), \quad (25)$$

де η – параметр швидкості навчання; a – постійна моменту.

В процесі навчання отримано задовільне значення середньоквадратичної похибки: 10^{-8} . Діапазон можливих вихідних значень моделі при зміні входних від нуля до максимального наведено на рис. 8 у вигляді поверхні. Якщо різниця між струмами $I_1 I_2$ перевищує 5 А і $I_1 > I_2$, то $\vartheta \approx 0$. Якщо $I_1 < I_2$, то $\vartheta \approx 1$, тобто після первинного навчання нейромережева модель реалізує функцію

$$\vartheta \approx \begin{cases} 0, & \text{якщо } I_1 > I_2 \\ 0,5, & \text{якщо } I_1 \approx I_2 \\ 1, & \text{якщо } I_1 < I_2 \end{cases} \quad (26)$$

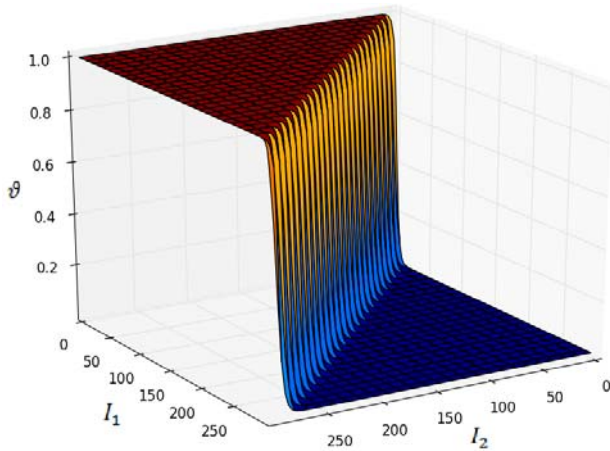


Рисунок 8 – Поверхня вихідних значень моделі НМ ОРТС після первинного навчання

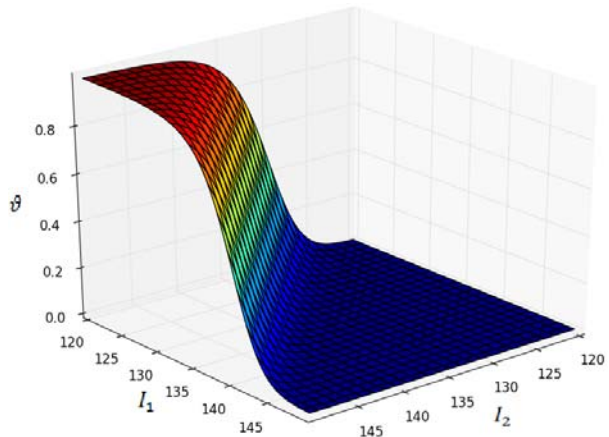


Рисунок 9 – Поверхня вихідних значень моделі НМ ОРТС після донавчання

З урахуванням неідентичності тягових характеристик двох ТЕД у візку в процесі руху при відсутності боксування або юза, буде спостерігатися відхилення значення ϑ від нуля. Причому при різних струмах знак ϑ може також змінюватись. Для врахування особливостей ТЕД потрібно донавчати нейромережеву модель у процесі руху. Після проведеного донавчання НМ ОРТС модель спроможна враховувати відхилення, яке склалось у процесі руху. Поверхню вихідних значень моделі НМ ОРТС при струмах ТЕД 120...150 А наведено на рис. 9. З рисунка видно, що після донавчання моделлю не втрачена здатність до розпізнавання ситуації, коли струми ТЕД у візку значно відрізняються.

У п'ятому розділі сформовано комплексну модель керування ТЕП з урахуванням обмежень щодо комутації, температури двигуна й боксування. Ефективне керування МВРС припускає вирішення завдання руху поїзда з мінімальними витратами енергії за умови дотримання діючих обмежень на швидкість руху, прискорення й керування. Для контролю стану ТЕП рухомого складу у схему керування МВРС уведено додаткове обладнання, функціонування якого побудовано на використанні підходу, заснованого на аналізі таксономічного показника. Для визначення таксономічного показника побудована матриця спостережень $X(t)$.

$$X(t) = \begin{vmatrix} x_1(t_1) & x_2(t_1) & \dots & x_n(t_1) \\ x_1(t_2) & x_2(t_2) & \dots & x_n(t_2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1(t_m) & x_2(t_m) & \dots & x_n(t_m) \end{vmatrix} \quad (27)$$

Кожний зі стовпців матриці відповідає одному з вимірюваних параметрів x_1, \dots, x_n . Число m рядків матриці відповідає числу тактів вимірів контрольованих показників. У випадку перевищення одного з контрольованих параметрів припустимого значення (розладнання) відповідний сигнал надходить у систему керування для обмеження струму і на пульт машиніста для візуального контролю. Реалізація наведених співвідношень виконана за допомогою відомої рекурентної нейронної мережі RTRN.

Задача формування ефективних методів керування тяговим електроприводом електропоїзда у п'ятому розділі вирішується шляхом використання нейронних мереж адаптивної резонансної теорії. На основі дискретної нейронної мережі АРТ-1 пропонується асоціативна пам'ять, зображена на рис.10, що складається із двох модулів, кожний з яких є нейронною мережею АРТ-1. Модуль М1 на основі параметрів поточного стану руху поїзда (номер ділянки; ідентифікатор; m – маса; $v(x)$ – оцінка швидкості руху на відповідній ділянці; $\Delta t(x)$ – оцінка відхилення у часі від ефективного режиму (запізнення, випередження)) визначає у асоціативній пам'яті системи керування «найбільш прийнятний» за поточними параметрами еталонний режим, який у подальшому передається модулю М2 для зберігання законів руху тягового рухомого складу по перегону, наприклад, у вигляді графіків. Машиніст за допомогою блока керування задає код перегону, який подається на вхідні нейрони модуля 1. Цей код визначає нейрон-переможець Y_j у шарі розпізнавальних елементів, вихідний сигнал якого через *нейрон* A_j асоціативного A -шару нейронів (при наявності сигналу визначення асоціації на виході блока керування) надходить на вхід *нейрона* Y_j другого модуля асоціативної пам'яті. У пам'яті кожного Y -нейрона зберігається траєкторія руху тягового рухомого складу по відповідному перегону. За вхідним сигналом з виходу модуля 1 будь-який Y -нейрон модуля 2 через нейрони шарів Z і S видає на екран монітора машиніста зображення траєкторії руху складу по перегону. На цьому ж екрані відображається не тільки рекомендована (оптимальна) траєкторія руху, але й поточна траєкторія руху. Наявність цих двох траєкторій дозволяє машиністові підтримувати енергозберігаючий режим руху тягового рухомого складу.

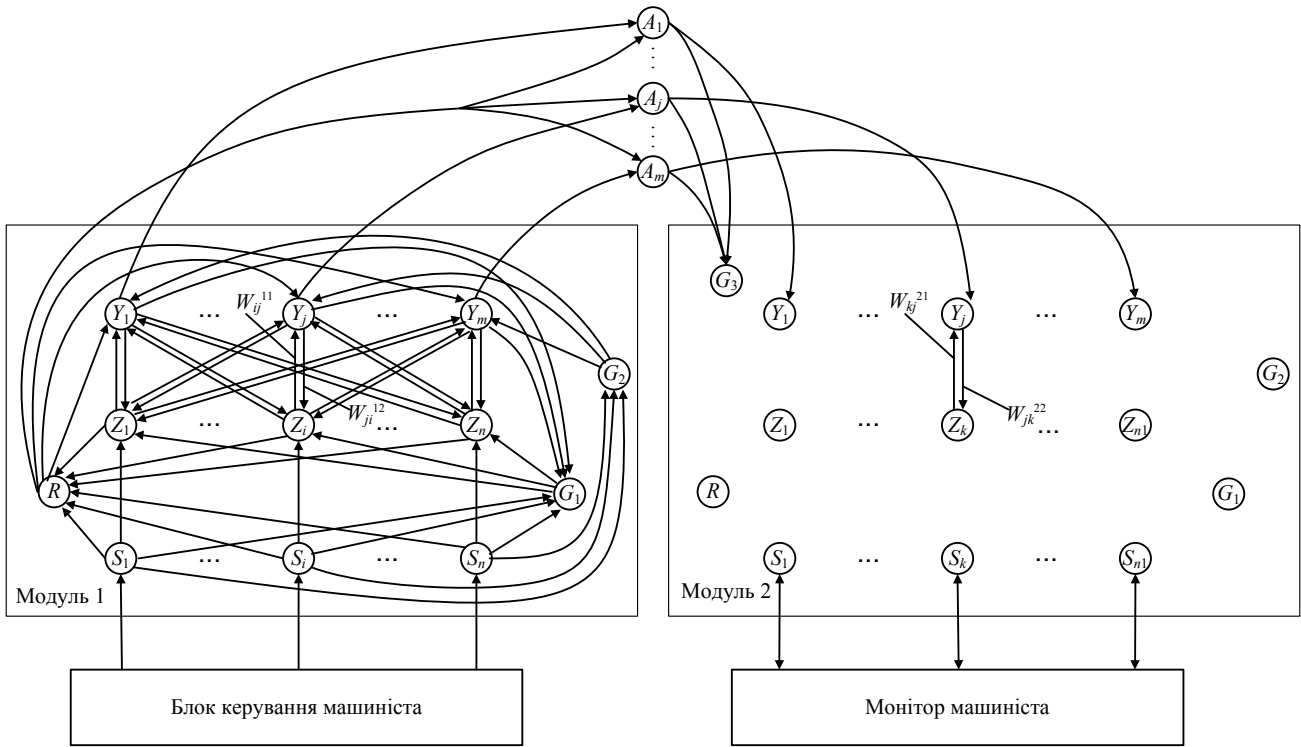


Рисунок 10 – Реалізація асоціативної пам'яті дискретної нейронної мережі ART-1

З метою реалізації аналогових методів регулювання тягового струму у п'ятому розділі було проведено моделювання пускових характеристик ТЕД із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є.

Розглядаючи природну характеристику ТЕД у часі, перейдемо до деякої функції $I^{Pr}(t)$. Прийнемо, що для $I^{Pr}(t)$ конкретні значення часу, за винятком нульового, не визначені. Відповідно положенням класичної теорії автоматичного регулювання, щільнісна функція відклику $H(f)$ зв'язує змінні входу $X(f)$ та виходу $Y(f)$ системи таким чином:

$$Y(f) = H(f)X(f). \quad (28)$$

Це рівняння отримуємо за результатом застосування перетворення Фур'є до обох частин рівняння:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau, \quad (29)$$

де $h(\tau)$ – імпульсна характеристика системи, тобто реакція системи на дельта-функцію Дірака – $\delta(t)$. Для систем, які можуть бути фізично реалізовані, нижня межа інтегрування дорівнює нулю.

Припустимо, що функція зміни струму $I^{Ip}(t)$ є імпульсною характеристикою ТЕД $h_{ТЕД}(\tau)$ з додаванням нульового значення, тобто

$$h_{ТЕД}(0) = 0 \quad \text{та} \quad h_{ТЕД}(t+1) = I^{Ip}(t). \quad (30)$$

Застосовуючи комплексне пряме перетворення Фур'є (F^+), отримуємо

$$H_{ТЕД}(f) = F^+ [h_{ТЕД}(\tau)] = |H_{ТЕД}(f)| e^{j\varphi(f)}, \quad (31)$$

де $|H_{ТЕД}(f)| = \sqrt{(Re[H_{ТЕД}(f)])^2 + (Im[H_{ТЕД}(f)])^2}$ – амплітуди спектральних складових; $\varphi(f) = \arctg \frac{Im[H_{ТЕД}(f)]}{Re[H_{ТЕД}(f)]}$ – їх фаза; Re, Im – реальна та уявна складові комплексного спектра відповідно.

На основі виразів (28) – (31), застосовуючи пряме перетворення Фур'є F^+ для переходу в частотну та зворотне F^- для переходу в часову області, отримуємо модель у вигляді виразу (32), яка зв'язує вхідний сигнал керування $x(t)$ з вихідним $y(t)$. Причому останній фактор є функцією зміни струму ТЕД як результат реакції на $x(t)$.

$$y(t) = F^- [H_{ТЕД}(f) \cdot F^+ [x(t)]] . \quad (32)$$

Аналітичний вираз (32) дозволяє виконувати теоретичні розрахунки в безперервному часі при однозначно визначених функціях $h_{ТЕД}(\tau)$ та $x(t)$.

З точки зору практичної доцільності, слід перейти до дискретного часу t_i де $i = 0, 1, \dots, N$, та до застосування дискретного перетворення Фур'є: DFT_N^+ , DFT_N^- – прямого та зворотного відповідно. Вважаємо, що кінцеве значення часу t_i та розрядність DFT -перетворення збігаються і дорівнюють N .

З урахуванням сформованих обмежень вираз (32) перетворюється до такого:

$$\overline{y(t_i)} = DFT_N^- [DFT_N^+ [\overline{h_{ТЕД}(t_i)}] \cdot DFT_N^+ [\overline{x(t_i)}]] , \quad (33)$$

де $\overline{x(t_i)}$ – вхідний сигнал керування у вигляді вектора дискретних значень в моменти часу t_i ; $\overline{y(t_i)}$ – вектор вихідних значень струму ТЕД; $\overline{h_{ТЕД}(t_i)}$ – дискретна імпульсна характеристика.

Результатом прямого DFT – перетворення є вектор комплексних значень розмірністю N , тоді

$$\overline{y(t_i)} = DFT_N^- [\overline{h_{ТЕД}(Re_i, Im_i)} \cdot \overline{x(Re_i, Im_i)}], \quad (34)$$

де у квадратних дужках – операція векторного множення елементів комплексних спектрів імпульсної характеристики та вхідного сигналу в частотній області. Результатом множення є вектор $\overline{M(Re_i, Im_i)} = \overline{h_{ТЕД}(Re_i, Im_i)} \cdot \overline{x(Re_i, Im_i)}$ розмірністю N . Тоді вираз (30) набуває вигляду

$$\overline{y(t_i)} = DFT_N^- [\overline{M(Re_i, Im_i)}]. \quad (35)$$

У свою чергу, результатом зворотного DFT -перетворення є вектор комплексних значень $\overline{y'(Re_i, Im_i)}$. Тоді перехід до часової області, в якій представлено вектор $\overline{y(t_i)}$, здійснюється відповідно до такого виразу:

$$\overline{y(t_i)} = \sqrt{y'(Re)^2 + y'(Im)^2}. \quad (36)$$

Моделювання зміни тягового струму ТЕД, яке наведено у вигляді виразів (27) – (31), являє собою послідовність обчислень для визначення $\overline{y(t_i)}$ за апіорно встановленими значеннями векторів $\overline{x(t_i)}$ та $\overline{h_{ТЕД}(t_i)}$ (рис. 11-16).

Процес функціонування системи автоматичного корегування сигналів керування за апіорно встановленим режимом руху.

Початкові умови: апіорно встановлений оптимальний режим рушання (пускова характеристика) – $Y_T(v)$ (рисунок 11, б); населеність електропоїзда невизначена; період функціонування автоматичної системи корегування – 1 с.

Початок руху за первинними значеннями $I_T^{ПФ}(t)$, $Y_T(v)$, $X_T(t)$. Фіксуються фактичні значення струму ТЕД та швидкості руху датчиками, встановленими на електропоїзді. Через кожну секунду починає функціонувати автоматична система корегування таким чином:

- порівнюються первинні та фактичні значення $Y_T(v)$ та $Y_\Phi(v)$ (рис. 12, а);
- виявлення розбіжностей.

Наприклад, на рис. 12, а показано, що електропоїзд за першу секунду руху набрав швидкість 2 (км/год), але струм ТЕД дещо перевищував потрібні значення;

- якщо виявлені розбіжності, то за фактичним значенням $Y_{\Phi}(v)$ розраховується фактична імпульсна характеристика

$$\overline{I_{\Phi}^{Ip}(t)} = DFT_N^{-}[DFT_N^{+}[\overline{Y_{\Phi}(v)}] \cdot DFT_N^{+}[\overline{X(t)}]]$$

$$\overline{X(t)} = DFT_N^{-}[DFT_N^{+}[\overline{I_{\Phi}^{Ip}(t)}] \cdot DFT_N^{+}[\overline{Y_{\Phi}(v)}]]$$

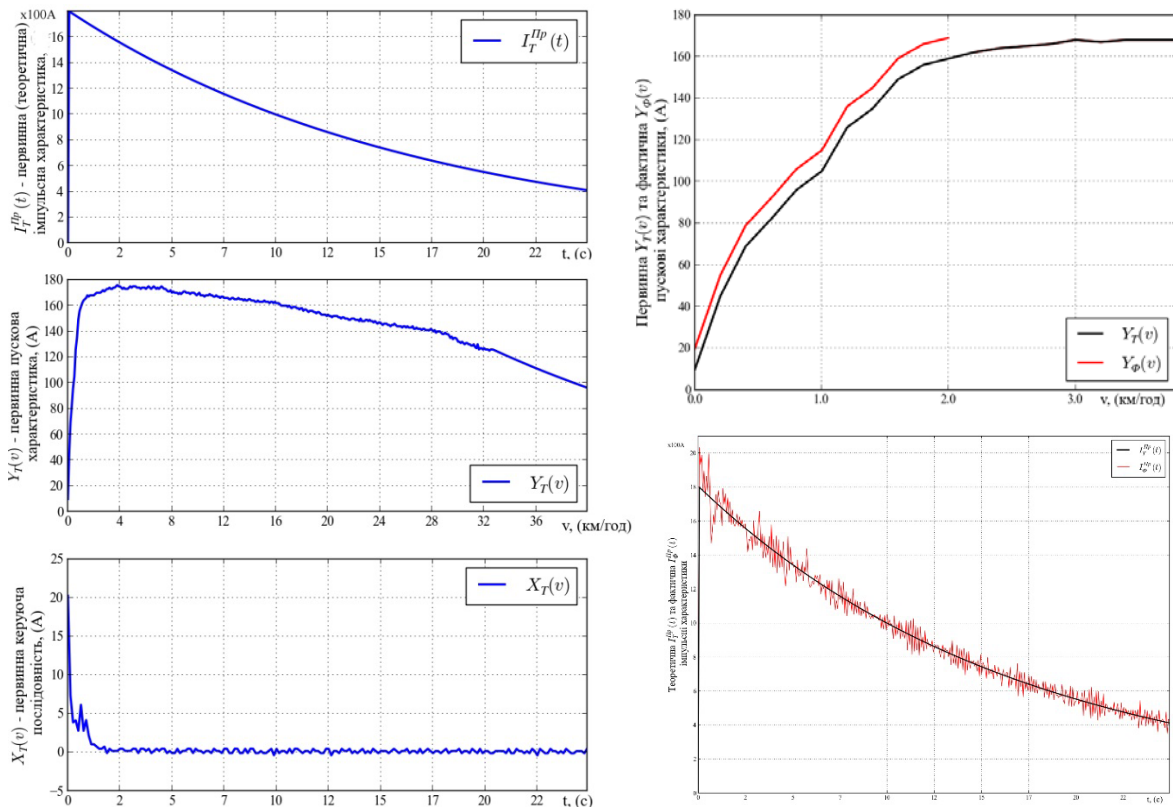


Рисунок 11 – Первинні дані для моделювання пускових характеристик тягових електродвигунів із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є

Рисунок 12,а – Первинні та фактичні значення $Y_T(v)$ та $Y_{\Phi}(v)$; Рисунок 12, в - первинні та розраховані значення $I_T^{Ip}(t)$ та $I_{\Phi}^{Ip}(t)$

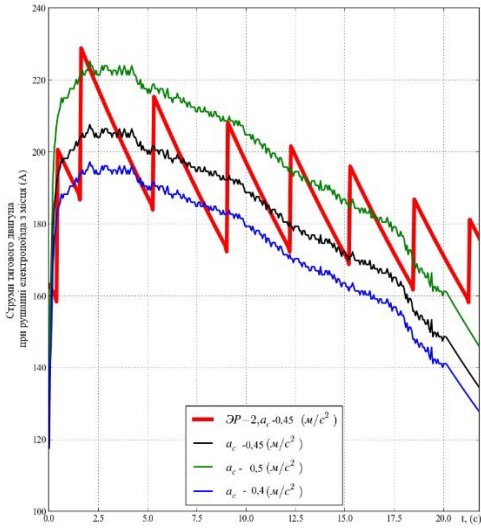


Рисунок 13 – Порівняння струмів ТЕД при реостатному та імпульсному керуванні для різних програм руху

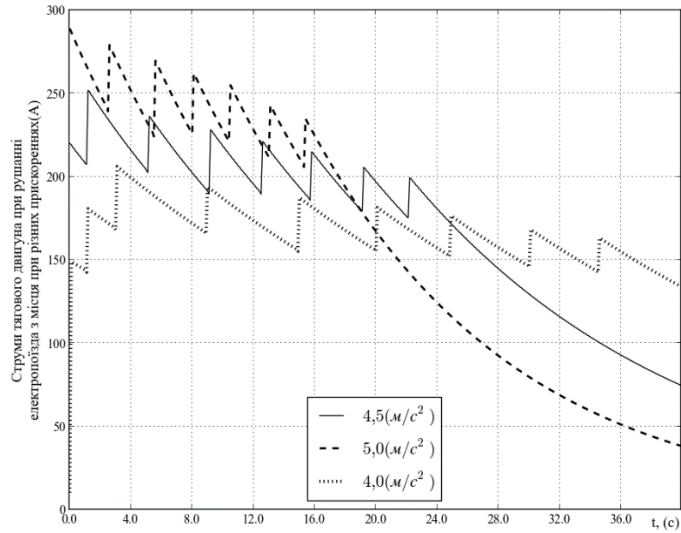


Рисунок 14 – Порівняння струмів ТЕД при реостатному режимі керування для різних прискорень

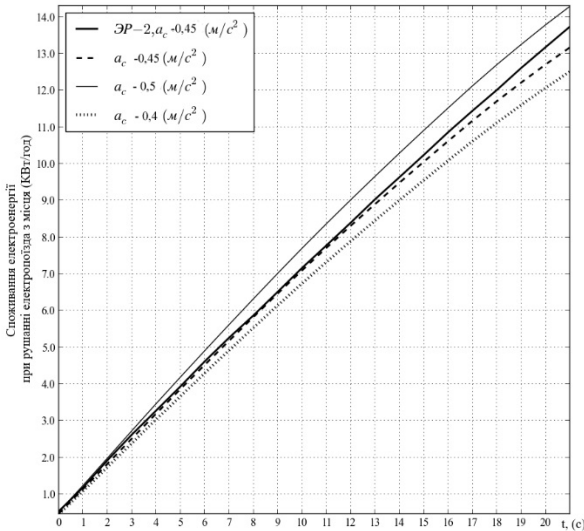


Рисунок 15 – Порівняння споживання електроенергії ТЕД при реостатному та імпульсному керуванні для різних програм руху

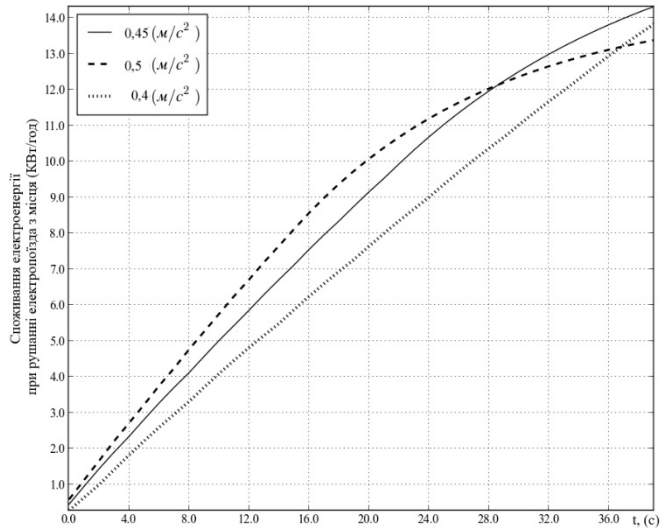


Рисунок 16 – Порівняння споживання електроенергії ТЕД при реостатному режимі керування для різних прискорень

Загальна споживана електроенергія одним ТЕД за перші 20 секунд початку руху при середніх прискореннях така: реостатне (ЭР-2 , $a_c = 0,45 \text{ м/с}^2$) – 13,181 (кВт/год); імпульсне ($a_c = 0,5 \text{ м/с}^2$) – 14,536 (кВт/год); імпульсне - ($a_c = 0,45 \text{ м/с}^2$) – 12,709 кВт/год); імпульсне - ($a_c = 0,40 \text{ м/с}^2$) 12,073 (кВт/год)

Загальна споживана електроенергія одним ТЕД за перші 38 секунд початку руху при реостатному режимі керування для різних прискорень: $a_c = 0,4 \text{ м/с}^2$ – 13,382 (кВт/год); $a_c = 0,45 \text{ м/с}^2$ – 13,626 (кВт/год); $a_c = 0,50 \text{ м/с}^2$ – 13,384 (кВт/год).

Результати моделювання показують, що при застосуванні запропонованих у роботі методів керування ТЕП МВРС можливо заощадити 3,58 % питомої електроенергії, а найбільша похибка моделювання не перевищує 3,2 %.

У шостому розділі проведена оцінка економічної ефективності впровадження запропонованих у роботі методів та моделей прогнозування ефективних параметрів керування ТЕП МВРС на ДП «Південна залізниця». Встановлено, що загальна сума очікуваного економічного ефекту від їх розроблення і застосування протягом шести років з урахуванням зміни вартості грошей у часі складе 29571,6 тис. грн. При цьому визначено період окупності одноразових інвестиційних витрат. Показано, що одноразові витрати окупляться в той рік, коли їх сума, приведена до розрахункового року, дорівнюватиме або стане меншою за сукупну величину економічного ефекту, отриману за відповідну кількість років розрахункового періоду. З розрахунків економічного ефекту видно, що одноразові витрати окупляться у першій половині другого року реалізації проекту.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему підвищення енергетичної ефективності роботи та зменшення експлуатаційних витрат тягових електроприводів моторвагонного рухомого складу шляхом подальшого розвитку нових методів і моделей прогнозування ефективних параметрів їх керування, які, на відміну від існуючих, дозволяють прогнозувати процес керування з урахуванням особливостей функціонування тягових двигунів і нової форми подання законів управління.

На основі проведених досліджень сформульовано основні висновки.

1. На приміському залізничному транспорті України рівень покриття експлуатаційних витрат доходами від перевезень встановлює близько 15 %, тобто витрати перевищують сукупні доходи в 6,5 разу. З цього випливає, що скорочення експлуатаційних витрат є важливішим напрямком підвищення ефективності його роботи. Проведений аналіз результатів експлуатації існуючих систем керування тяговим рухомим складом показав, що тільки застосування безперервного моніторингу температури його гранично навантаженого устаткування зменшує: відмови тягових двигунів на 30-35 %; відмови реакторів, що згладжують, на 55-60 %; відмови перетворювачів на 30-35 %; відмови асинхронних допоміжних машин на 35-40 %; загоряння встаткування електровозів на 55-60 %; затягування міді колекторів тягових двигунів у 2,6-3,3 разу; кількість колових вогнів на колекторах тягових двигунів у 3,1-3,7 разу; зношування колекторів тягових двигунів у 2,8-3,4 разу; зношування щіток тягових двигунів у 1,2-1,3 разу, а його експлуатація без системи регулювання тепловими режимами устаткування збільшує кількість відмов в 1,5-3,5 разу. Це дозволяє зробити висновок про необхідність

впровадження нових методів і моделей прогнозування ефективних параметрів керування також і тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу. Однак, незважаючи на наявність багатьох досліджень у галузі розроблення й виробництва технічних засобів регулювання та управління моторвагонним рухомим складом, наукова проблема визначення ефективних параметрів керування тяговим електроприводом при додаткових обмеженнях досі не вирішена.

2. На основі геометричної теорії управління сформовано модель і розроблено методи керування моторвагонним рухомим складом з тяговими електроприводами постійного струму, які, на відміну від існуючих, дозволяють оптимізувати за критерієм мінімуму витрати електроенергії процес керування електропоїздами при додаткових обмеженнях характеристик перехідних динамічних процесів, зміні зовнішніх факторів та умов їхнього руху. При цьому найбільша похибка моделювання не перевищує 3,2 %.

3. Розроблено методи і моделі оцінки ступеня іскріння тягових двигунів, які, на відміну від існуючих, визначають у реальному часі залежність нульової компоненти спектра тягового струму за відповідний проміжок часу від кількості іскор, що дозволяє формувати її ступінь приналежності до класу комутації зі значенням середньоквадратичної помилки $E_{ДП} < 10^{-8}$. Запропонована математична модель іскрового струму тягового двигуна дозволяє встановити взаємопов'язаність електромагнітних процесів у двигуні з явищами, які мають місце на поверхнях контакту щіток із колектором і створюють у струмі живлення специфічні складові, що містять інформацію як про ці явища, так і про характер комутації окремих секцій або їх груп. Для двигуна типу ВЕВ 1146.9 було виконано розрахунки та зроблено їх порівняння з результатами натурних випробувань, що дозволило провести перевірку адекватності моделі. Проведене моделювання на двигунах постійного струму ВЕВ 1146.9 і ТЕД 1ДТ-003 показало, що розроблені моделі є універсальними.

4. Розроблено загальну прогнозну модель теплового стану тягових двигунів, що реалізована шляхом застосування динамічної нейронної мережі типу NARX з модифікованим алгоритмом навчання за методом зворотного поширення помилки, яка, на відміну від існуючих, отримує від системи керування тяговим електроприводом “план розвитку подій” у вигляді значень струму та швидкостей руху за прогнозований проміжок часу $[t_0, t_1, t_2, \dots, t_K]$ та розраховує значення температури $T(t)$ за вказаний час. Використання теплової моделі для тягового електродвигуна 1ДТ.0012 дозволило отримати параметри зміни вхідних сигналів від часу при розгоні електропоїзда: сигнал активної потужності і швидкості повітряного потоку обдування двигуна. Встановлено, що застосування мережі NARX з двома парами ліній затримок задовольняє висунуті до її вимоги як за формою вихідного сигналу, так і за отриманим значенням помилки $E(t_N)_{min} = 0,104069$.

Розроблено нейромережеву модель контролю боксування колісних пар, яка, на відміну від існуючих, враховує неідентичність характеристик тягових

двигунів у візку в процесі руху моторвагонного рухомого складу. Показано, що у процесі навчання моделі отримано задовільне значення середньоквадратичної похибки контролю 10^{-8} .

5. Розроблено інтелектуальну модель керування моторвагонним рухомим складом, що реалізована з використанням асоціативної пам'яті на основі дискретної нейронної мережі АРТ-1, яка, на відміну від існуючих, дозволяє мінімізувати енергетичні витрати в процесі перевезень. При цьому встановлено граничні умови функціонування мережі.

6. Розроблено математичні моделі та проведено моделювання пускових характеристик тягових двигунів із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є, що дозволяє, на відміну від існуючих методів, реалізувати як дискретне, так і імпульсне регулювання тягового струму з мінімальною кількістю гармонічних складових. На прикладі моторного вагона ЕР2 показано, що моделювання пускових характеристик тягових двигунів із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є дозволяє оптимізувати процес регулювання тягового струму, при цьому опір реостата повинен бути представлений аналоговою функцією часу. У результаті моделювання встановлено, що споживання електроенергії одним тяговим двигуном за перші 20 секунд початку руху при різних режимах керування та середніх прискореннях складає: реостатне ($a_c = 0,45 \text{ м/с}^2$) – 13,181 (кВт/год); імпульсне ($a_c = 0,5 \text{ м/с}^2$) – 14,536 (кВт/год); імпульсне ($a_c = 0,45 \text{ м/с}^2$) – 12,709 (кВт/год); імпульсне ($a_c = 0,4 \text{ м/с}^2$) – 12,073 (кВт/год), що дозволяє заощаджувати 3,58 % електроенергії при похибці моделювання не більше 3,2 %.

7. Проведено розрахунок техніко-економічної ефективності впровадження результатів дисертаційної роботи, а саме:

- рекомендацій з удосконалення методів керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу з урахуванням обмежень щодо комутації, температури й боксування;
- методів визначення ефективних законів керування в процесі розгону електропоїзда;
- методів визначення ефективних законів керування процесами руху електропоїзда.

Показано, що впровадження вищевказаних розробок дозволяє визначити ефективний швидкісний режим руху моторвагонного рухомого складу та забезпечити найбільш якісне використання тягових можливостей електродвигунів, гальмівних систем, деталей, вузлів і механізмів візків та інших агрегатів і, відповідно, скоротити поточні витрати на їх експлуатацію. Очікується, що загальна сума економічного ефекту від застосування результатів роботи на ДП «Південна залізниця» протягом шести років з урахуванням зміни вартості грошей у часі складе 29571,6 тис. грн. При цьому одноразові витрати окупляться у першій половині другого року реалізації проекту.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

Основні праці:

1. Блиндюк, В.С. Аналіз основних етапів розвитку систем автоматичного керування рухом на залізничному транспорті та в метрополітенах [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 126. – С. 86-90
2. Носков, В.И. Тяговый электропривод дизель-поезда ДЭЛ-02 [Текст] / В.И. Носков, М.В. Липчанский, В.С. Блиндюк, В.Г. Чистяк // Локомотив-информ. – 2011. – № 8. – С. 8-10.
3. Блиндюк, В.С. Концепція побудови систем автоматизованого керування рухом поїздів [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 127. – С. 43-56
4. Блиндюк, В.С. Особливості застосування тягових двигунів у електроприводах [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 134. – С. 199-203.
5. Носков, В.И. Контроль и диагностика моторвагонных поездов с использованием нейронных сетей [Текст] / В.И. Носков, М.В. Липчанский, В.С. Блиндюк // Комунальне господарство Міст: наук.-техн. зб.; сер. Технічні науки та архітектура. – Харків: ХНАМГ, 2011. – Вип. 101. – С. 278-283.
6. Носков, В.И. Применение современных информационных технологий на тяговом подвижном составе [Текст] / В.И. Носков, М.В. Липчанский, В.С. Блиндюк, В.Г. Чистяк // Локомотив-информ. – 2011. – № 6. – С. 30-32.
7. Блиндюк, В.С. Моделювання пускових характеристик тягових двигунів моторвагонних рухомих одиниць [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 30. – С. 96-106.
8. Блиндюк, В.С. Моделювання пускових характеристик ТЕД із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є [Текст] / В.С. Блиндюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 4 (додаток). – С. 98-100.
9. Блиндюк, В.С. Вплив процесу комутації на часову структуру струму живлення тягових двигунів електропоїздів [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 133. – С. 357-372.
10. Блиндюк, В.С. Визначення ступеня іскріння тягових електродвигунів моторвагонного рухомого складу [Текст] / В.С. Блиндюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 6 (97). – С. 63-69.
11. Блиндюк, В.С. Синтез оптимального приймача іскрової компоненти струму тягового двигуна [Текст] / В.С. Блиндюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – № 1. – С. 82-88.
12. Блиндюк, В.С. Дискретне динамічне моделювання електричних машин тягового рухомого складу (частина 1) [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. 28. – С. 202-210.

13. Чепцов, М.М. Нейромережева модель динамічного логічного елементу “НІ” [Текст] / М.М. Чепцов, М.М. Бабаєв, В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 128. – С. 165-175.

14. Блиндюк, В.С. Моделирование теплового режима работы тягового двигателя в задаче автоматического управления моторвагонным подвижным составом [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 29. – С. 242-246.

15. Блиндюк, В.С. Прогнозне нейромережеве моделювання теплових режимів функціонування тягових двигунів моторвагонних рухомих одиниць [Текст] / В.С. Блиндюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 2. – С. 87-96.

16. Кузьменко, Д.М. Нейромережеве моделювання функцій систем залізничної автоматики [Текст] / Д.М. Кузьменко, В.С. Блиндюк, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 122. – С. 33-43.

17. Дмитриенко, В.Д. Определение оптимальных законов управления процессами движения электропоезда [Текст] / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, В.С. Блиндюк, М.В. Липчанский, А.О. Нестеренко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 38. – С. 55-69.

18. Носков, В.И. Использование таксономического показателя для контроля моторвагонных поездов [Текст] / В.И. Носков, М.В. Липчанский, В.С. Блиндюк // Комунальне господарство міст: наук.-техн. зб. – Харків: ХНАМГ, 2011. – Вип. 99. – С. 388-393.

19. Кузьменко, Д.М. Деградаційний аналіз надійності нейродинамічної функціональної моделі [Текст] / Д.М. Кузьменко, В.С. Блиндюк, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 124. – С. 68-77

20. Кузьменко, Д.М. Аналіз залежності показників надійності нейродинамічної функціональної моделі від кількості ліній затримок [Текст] / Д.М. Кузьменко, В.С. Блиндюк, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2011. – Вип. 26. – С. 71-77.

21. Блиндюк, В.С. Розробка нейромережевої моделі контролю юзу або буксування колісних пар у візку моторного вагона [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 31. – С. 187-191.

22. Блиндюк, В.С. Економічна оцінка доцільності впровадження системи автоведення на приміських електропоїздах Південної залізниці [Текст] / В.С. Блиндюк, Є.І. Балака // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 129. – С. 100 -111.

23. Блиндюк, В.С. Керування електропоїздами метрополітену на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії. Ч.1. Побудова асоціативної пам'яті на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 135. – С. 20-25.

24. Блиндюк, В.С. Керування електропоїздами метрополітену на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії. Ч. 2. Розробка методу оптимізації руху поїзда метрополітену на основі дискретної нейронної мережі АРТ-1 [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 136. – С. 135-146.

25. Блиндюк, В.С. Нейромережева кон'юнктивна модель [Текст] / В.С. Блиндюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – № 2. – С. 97-101.

26. Спосіб підвищення точності обліку і контролю електроенергії вимірювальним комплексом [Текст]: пат. 88126 України: МПК Н01F 38/00, Н01F 38/20, Н01F 38/28 / Бутенко В.М., Блиндюк В.С., Гаєвський В.В. [та ін.]; власник Українська державна академія залізничного транспорту. – № а 200903412; заявл. 09.04.2009; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17. – 4 с.

27. Індуктивно-дротовий датчик для виявлення транспортного засобу в межах певної ділянки шляху [Текст]: пат. 101096 України МПК В 61 L 1/100/ Бабаєв М.М., Блиндюк В.С., Ананьєва О.М., Гребенюк В.Ю.; власник Українська державна академія залізничного транспорту. – № а 201111355; заявл. 26.09.2011; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. – 4 с.

28. Індуктивно-дротовий датчик для виявлення транспортного засобу в межах певної ділянки шляху (корисна модель) [Текст]: пат. 69618 України МПК В 61 L 1/100 / Бабаєв М.М., Блиндюк В.С., Ананьєва О.М., Гребенюк В.Ю., власник Українська державна академія залізничного транспорту. – № u 201111537; заявл. 29.09.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. – 4 с.

Додаткові праці:

29. Двополярний ключ (корисна модель) [Текст]: пат. 30066 Україна, МПК Н03К 17/62 / Бутенко В.М., Блиндюк В.С., Головка О.В. [та ін.]; власник Українська державна академія залізничного транспорту. – № u 200711340; заявл. 12.10.2007; опубл. 11.02.2008, Бюл. № 3. – 4 с.

30. А. С. № 39465 України. Комп'ютерна програма “Модель динамічної нейронної мережі з модифікованим алгоритмом навчання за методом зворотного поширення помилки” (“Model of Dynamic Neural Network”) [Текст] / Чепцов М.М., Блиндюк В.С., Кузьменко Д.М., Германенко О.О. – № 39639; заявл. 23.05.2011; опубл. 03.08.2011.

31. Блиндюк, В.С. Енергозбереження в силових електроприводах [Текст] / В.С. Блиндюк // Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины: тези доп. 21-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Алушта, вересень 2008 р.) // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – № 4 (Додаток). – С. 28.

32. Бабаєв, М.М. Алгоритмы нейро-нечеткого функционирования автоматизированных систем управления железнодорожными станциями / М.М. Бабаєв, В.С. Блиндюк // Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины: тези доп. 22-ї Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Алушта, вересень 2010 р.) // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 4 (Додаток). – С. 10.

33. Блиндюк, В.С. Аналіз ресурсозберігаючих технологій роботи підприємств залізничного транспорту [Текст] / В.С. Блиндюк // Перспективные

компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины: тезисы доп. 23-й Междунар. науч.-практ. конф. (м. Алушта, вересень 2010 р.) // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – № 4 (Додаток). – С. 39.

34. Блиндюк, В.С. Нейродинамічна модель системи автоматичного керування рухом поїздів [Текст] / В.С. Блиндюк // «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины»: тез. докл. 24-й междунар. конф. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 5. – С. 121.

35. Носков, В.І. Оцінка стану рухомого складу за допомогою таксономічного показника і нейронних мереж [Текст] / В.І. Носков, В.С. Блиндюк // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези допов. ХІХ Міжнар. наук.-практ. конф. (1-3 червня 2011 р.). – Харків: НТУ «ХПІ». – Ч. IV. – С. 62.

36. Носков, В.І. Контроль в експлуатації тягового подвижного состава с помощью таксонометрического показателя и нейронных сетей [Текст] / В.І. Носков, В.С. Блиндюк // Інноваційні технології на залізничному транспорті: зб. наук. праць ІІІ Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Тель-Авів (Ізраїль)). – Луганськ: СУНУ, 2012. – С. 33.

37. Блиндюк, В.С. Перспективи зниження енергоємності перевезень шляхом автоматизації процесу керування рухом поїздів [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць: тези доп. 74-й Міжнар. наук.-техн. конф. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 129. – С. 204.

38. Блиндюк, В.С. Моделювання пускових характеристик тед із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є [Текст] / В.С. Блиндюк // Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железных дорог Украины: тез. докл. 25-й междунар. науч.-практ. конф. (г. Алушта, сентябрь 2012 г.) // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – № 4 (Додаток). – С. 98-99.

39. Блиндюк, В.С. Дискретне динамічне моделювання електричних машин тягового рухомого складу [Текст] / В.С. Блиндюк // Безопасность и электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте: тез. V Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск: ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2012. – С. 12.

40. Блиндюк, В.С. Визначення оптимальних законів керування тяговим електроприводом / В.С. Блиндюк // Внедрение перспективных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и средств телекоммуникаций на базе цифровизации [Текст]: тез. докл. 26-й Междунар. науч.-практ. конф. (г. Алушта, сентябрь 2013 г.) // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013. – № 4 (Додаток). – С. 98.

41. Електротехніка та електромеханіка систем залізничної автоматики: підручник [Текст] / М.М. Бабаєв, М.Г. Давиденко, Г.І. Загарій, Ю.В. Соболев,

В.С. Блиндюк, О.М. Прогонний, О.М. Ананьєва, К.А. Трубчанінова. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 608 с.

42. Чепцов, М.М. Нейромережеве моделювання в системах керування на залізничному транспорті [Текст]: монографія / М.М. Чепцов, В.С. Блиндюк, Д.М. Кузьменко. – Донецьк: ДонІЗТ, 2013. – 143 с.

АНОТАЦІЯ

Блиндюк В.С. Методи та моделі прогнозування ефективних параметрів керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт – Українська державна академія залізничного транспорту, Міністерство освіти і науки України, м. Харків, 2014.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми підвищення енергетичної ефективності роботи та зменшення експлуатаційних витрат тягових електроприводів моторвагонного рухомого складу.

У роботі встановлено й теоретично обґрунтовано можливість оптимізації процесу руху електропоїздів за критерієм мінімальної витрати електроенергії при дотриманні діючих обмежень на керування, швидкість і прискорення. Розроблено математичні та нейромережеві моделі іскрового струму, боксування та теплових режимів роботи тягових двигунів, що функціонують у реальному часі. Проведено моделювання пускових характеристик тягових двигунів та синтез оптимального приймача іскрової компоненти струму якоря. Загальна сума очікуваного економічного ефекту від розроблення й застосування запропонованих у роботі методів і моделей прогнозування ефективних параметрів керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу з урахуванням зміни вартості грошей у часі протягом шести років складе 29571,6 тис. грн.

Ключові слова: тяговий двигун, рухомий склад, математична модель, нейромережа, процес регулювання, іскровий струм, синтез, моделювання, похибка.

АННОТАЦИЯ

Блиндюк В.С. Методы и модели прогнозирования эффективных параметров управления тяговым электроприводом моторвагонного подвижного состава. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт – Украинская государственная академия железнодорожного транспорта, Министерство образования и науки Украины, г. Харьков, 2014.

Диссертационная работа посвящена решению научно-прикладной проблемы повышения энергетической эффективности работы и уменьшения эксплуатационных расходов тяговых электроприводов моторвагонного подвижного состава.

Основываясь на принципах геометрической теории управления, в работе была установлена и теоретически обоснована возможность оптимизации процесса движения электропоездов по критерию минимального расхода электроэнергии при соблюдении действующих ограничений на управление, скорость и ускорение. В основу сформированного комплекса моделей и синтеза оптимальных управлений тяговым электроприводом постоянного тока положены системы уравнений в форме Бруновского и принцип максимума Понтрягина. На основе нейронных сетей адаптивной резонансной теории созданы научные основы управления тяговым электроприводом подвижного состава с учетом ограничений относительно коммутации, температуры двигателей и боксования. Разработаны модели и методы управления моторвагонным подвижным составом, которые адекватно воссоздают процессы, протекающие в системах управления тяговым электроприводом и позволяют провести моделирование его контуров управления. С целью оптимизации пусковых режимов работы тяговых двигателей на модели проведены исследования разгона электропоезда при различных варьируемых (ток, профиль пути, степень загрузки вагона) параметрах движения. В процессе исследований минимизировался функционал, который представляет собой линейную взвешенную комбинацию квадрата управления и времени разгона подвижного состава. Проведено моделирование пусковых характеристик тяговых двигателей с применением прямого и обратного комплексного преобразования Фурье. Для оценки воздействия коммутационных процессов на временную структуру тягового тока разработана математическая модель искрового тока тягового двигателя и проведен синтез оптимального приемника искровой компоненты тока якоря. Разработана нейросетевая динамическая модель устройства оценки степени искрения тягового двигателя, которая позволяет путем аналитического описания искровой компоненты тока якоря обеспечить возможность последующей ее оптимальной фильтрации в условиях действия внешних и внутренних помех. При этом сформулированы функциональные требования относительно модели, сформированы принципы разработки учебной последовательности для получения запланированных результатов и выполнен анализ исходных сигналов в амплитудной, частотной и

фазовой областях. На основе динамической нейронной сети типа NARX с модифицированным алгоритмом обучения методом обратного распространения погрешности разработаны тепловые нейросетевые модели тяговых двигателей, функционирующие в реальном масштабе времени. Разработанные модели позволяют контролировать как текущее тепловое состояние тяговых двигателей, так и прогнозировать их дальнейшую работу с учетом предыдущего состояния и индивидуальных особенностей. Во избежание выхода из строя тяговых двигателей и сохранения работоспособности тягового электропривода в случаях превышения допустимых значений относительно коммутации, температуры и боксования, предложено ввести в систему его управления соответствующие ограничения. С этой целью в схему управления моторвагонным подвижным составом введено дополнительное оборудование, функционирование которого построено на использовании нейронных сетей адаптивной резонансной теории и математических моделях, основанных на таксономическом показателе и реализованных с помощью рекуррентной нейронной сети RTRN, что позволило разработать новые методы управления тяговым электроприводом, которые учитывают ограничения относительно коммутации, температуры и боксования, а также позволяют контролировать в реальном времени техническое состояние тяговых двигателей. Общая сумма ожидаемого экономического эффекта от разработки и применения предлагаемых в работе методов и моделей прогнозирования эффективных параметров управления тяговым электроприводом моторвагонного подвижного состава с учетом изменения стоимости денег во времени в течение шести лет составит 29571,6 тыс. грн.

Ключевые слова: тяговый двигатель, подвижной состав, математическая модель, нейросеть, процесс регулирования, искровой ток, синтез, моделирование, погрешность.

ANNOTATION

Blindyuk V.S. Methods and models in the forecasting of efficient parameters in operation of power electric drives of EMU rolling stock – Manuscript.

Thesis for the Doctor of Engineering Science Academic Degree in Electric Transport (05.22.09) – Ukrainian State Academy of Railway Transport, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2014.

The thesis deals with engineering solutions to formation of methods and models for power efficient control of electric traction drives of EMU rolling stock.

Principles of the geometric control theory have made it possible to establish and theoretically substantiate the possibility to optimize the process of electric train movement with minimal electric power consumption subject to effective limitations on control, speed and acceleration. Equation systems in Brunovsky's form and Pontryagin's Maximum Principle are the basis of a set of models designed and synthesis of an optimal control of DC electric traction drives. It has been designed a

neural network dynamic model of traction engine sparking, and made synthesis of an optimal collector for armature current in sparking. Use of neural networks of the adaptive resonance theory (ART) and mathematical models, based on the taxonomic character, and implemented with the recurrent neural network RTRN has made it possible to develop new control methods of an electric traction drive, which take into account limitations on commutation, temperature and skidding, as well as real time control over power engines' technical condition. It has been developed the mathematical model and neural network modelling of starting characteristics of traction engines with the direct and inverse complex Fourier transform. It has been developed neural network models of thermal conditions of traction engines with NARX dynamic neural network and models of the modified error back propagation training algorithm. The total saving rate of development and implementation of the control system of electric traction drives of EMU rolling stock subject to the time value of money within a six-year period will account for UAH 29,571,600.

Key words: traction engine, rolling stock, mathematical model, neural network, regulating process, sparking, synthesis, modelling, error.

Блиндюк Василь Степанович

УДК 629.4.083:629.424.2

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ
ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ
МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ**

05.22.09 – електротранспорт

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Відповідальний за випуск

к.т.н., доцент Ананьєва О.М.

Підписано до друку 21.03.2014 р.
Формат паперу 60x84 1/16. Папір для множильних апаратів.
Умовн.-друк.арк. 1,9. Обл.-вид. арк.. 2,0.

Тираж 100. Замовлення № 225.

Видавництво ТОВ «Енергозберігаючі технології»
61050, Харків, Харківська набережна, 8.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1360 від 19.05.2003 р.