

**Міністерство освіти і науки України
Українська державна академія залізничного транспорту**

На правах рукопису

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант
д.т.н., професор М.М. Бабаєв

Харків 2014

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ МОТОРВАГОННИМ РУХОМИМ СКЛАДОМ	16

1.1 Аналіз основних етапів розвитку систем автоматичного керування рухомим складом на залізничному транспорті	16
1.2 Системи автоматичного регулювання та керування тяговим електроприводом рухомого складу	21
1.3 Проблеми і перспективи розвитку сучасних систем автоматичного регулювання та керування тяговим електроприводом електропоїздів	45
1.4 Висновки по розділу 1	54
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ЗАКОНІВ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ РУХУ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ	56
2.1 Лінеаризація математичної моделі тягового привода електропоїзда на основі засобів геометричної теорії керування	56
2.2 Синтез ефективних керувань тяговим приводом електропоїздів за допомогою системи керування у формі Бруновського й принципу максимуму Понтрягіна	69
2.3 Визначення ефективних законів керування в процесі розгону електропоїзда при додаткових обмеженнях	71
2.4 Вирішення завдання розгону електропоїзда при обмеженнях на витрату керування й перехідні динамічні процеси	77
2.5 Висновки по розділу 2	81
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ І ЧАСОВОЇ СТРУКТУРИ СТРУМУ ЖИВЛЕННЯ ТЯГОВОГО ДВИГУНА	82
3.1 Формування математичної моделі іскрового струму тягового двигуна	82
3.2 Визначення ступеня іскріння тягових двигунів шляхом оцінки параметрів часової структури живильного струму	102
3.3 Синтез оптимального приймача іскрової компоненти струму тягового двигуна	115
3.4 Нейромережна динамічна модель пристрою оцінки ступеня іскріння тягових двигунів	129
3.5 Висновки по розділу 3	163
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ	165
4.1 Розроблення загальної прогнозної моделі теплового стану тягових двигунів	165
4.2 Нейромережне моделювання теплових режимів функціонування тягових двигунів	168
4.3 Розроблення нейромережної моделі контролю боксування колісних пар	180
4.4 Висновки по розділу 4	187

РОЗДІЛ 5. РОЗВИТОК МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ ЩОДО КОМУТАЦІЇ, ТЕМПЕРАТУРИ ДВИГУНА Й БОКСОВАННЯ	189
5.1 Визначення таксономічного показника контролю стану тягового привода електропоїзда	189
5.2 Розроблення методів керування тяговим електроприводом електропоїзда на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії	194
5.3 Реалізація асоціативної пам'яті системи керування на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії	198
5.4 Моделювання пускових характеристик тягових електродвигунів із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є	216
5.5 Висновки по розділу 5	242
РОЗДІЛ 6. ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ	244
6.1 Соціальні аспекти погіршення фінансово-економічного стану приміського залізничного транспорту	244
6.2 Джерела отримання економічного ефекту від впровадження методів та моделей прогнозування ефективних параметрів керування тяговим електроприводом	247
6.3 Методичний підхід до оцінки економічної ефективності розроблення і впровадження методів ефективного регулювання та керування тяговим електроприводом	248
6.4 Визначення економічної ефективності впровадження методів регулювання та керування моторвагонним рухомим складом	255
6.5 Висновки по розділу 6	274
	275
ВИСНОВКИ	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	280
ДОДАТКИ	323
А. Програмне забезпечення моделювання електрорушійної сили самоіндукції у двигунах постійного струму	323
А.1. Програма моделювання параметрів ротора (файли rotor.h, rotor.cpp)	323
А.2. Програма моделювання параметрів статора (файли stator.h, stator.cpp)	
А.3. Програма моделювання процесу комутації (файли switching.h, s switching.cpp)	328

Б. Програма розрахунків і відображення пускових характеристик тягових двигунів	335
В. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи на ДП «Південна залізниця»	339
Г. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі УкрДАЗТ	341
Д. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальному процесі НТУ «ХПІ»	343

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Тяговий електропривод	ТЕП
Автоматичне регулювання та керування	АРУ
Тяговий двигун	ТЕД
Пристрій регулювання струму	ПРС
Моторвагонний рухомий склад	МВРС
Фазочастотна характеристика фільтра	ФЧХ
Аналого-цифровий перетворювач	АЦП
Електрорушійна сила самоіндукції	ЕРС
Швидкість руху	ШР
Нейронна мережа	НМ
Динамічна нейронна мережа	NARX
Рекурентна нейронна мережа	RTRN
Автоматизована система керування	АСК
Реле прискорення й гальмування	РПГ
Реостатний контролер	РК
Дискретна нейронна мережа	АРТ-1
Автоматичне ведення поїзда	АВП
Автоматизована локомотивна сигналізація	АЛС
Електронна обчислювальна машина	ЕОМ
Автоматичне регулювання швидкості	АРС
Система автоматичного управління гальмами	САУТ
Всеросійський науково-дослідний інститут залізничного транспорту	ВНИИЖТ
Система диспетчерського управління	СДУ
Система автоматичного ведення поїзда	САВП
Цент управління рухом	ЦУР

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах ринкових відносин залізничний транспорт займає одне із головних місць серед інших видів транспорту. При цьому на приміському транспорті України найбільшу частину тягових засобів складає моторвагонний рухомий склад (МВРС) з тяговим електроприводом постійного струму. Ефективність функціонування приміського транспорту значною мірою залежить від енергоефективного використання МВРС і людських ресурсів, що потребує необхідної координації роботи всіх управлінських підрозділів. У той же час рівень покриття експлуатаційних витрат доходами від перевезень у приміському залізничному сполученні складає близько 15 %, тобто витрати перевищують сукупні доходи в 6,5 разу. Одним із шляхів зменшення фінансових витрат, підвищення ефективності та якості функціонування приміського транспорту є впровадження нових техніко-технологічних рішень, що забезпечать найбільш раціональне використання тягових можливостей МВРС зі зниженням витрат електроенергії і збільшенням тривалості міжремонтного циклу. Вирішення цього завдання можливо шляхом застосування автоматизованих систем керування різного рівня й призначення, що у свою чергу потребує підвищення вимог до ефективності процесів керування, збільшення обсягу й швидкості передачі інформації, суттєвого зростання вимог до її вірогідності.

Сучасний рівень розроблення й виробництва технічних засобів автоматичного регулювання та керування МВРС неможливо забезпечити без проведення випереджальних досліджень, що потребує подальшого розвитку математичного супроводу, аналізу й синтезу нових, структурно складних систем і методів керування тягового електропривода (ТЕП).

Оскільки функціональним визначенням системи автоматичного регулювання та керування ТЕП є певна сукупність дій, то для досягнення поставленої мети проблему формування ефективних параметрів керування МВРС слід розглядати як проблему обґрунтованого вибору з множини альтернативних рішень з урахуванням особливостей об'єкта керування і нової форми подання законів управління.

Однак, як показує аналіз багатьох досліджень, ця проблема не вирішена. Серед відомих досліджень найпоширенішим методом аналізу й синтезу складних систем є «звичайна» лінеаризація, заснована на розкладанні нелінійної функції в ряд Тейлора й відкиданні нелінійних членів. У такий спосіб заміняється вихідна нелінійна модель наближеною лінійною моделлю з недоліками, що впливають:

- якість керування визначається в малій зоні заданого режиму, при цьому розміри цієї зони невідомі;

- оскільки заданий режим є функцією часу, то ця модель стає нестационарною, і аналіз системи практично не спрощується;

- існуючі способи дослідження систем керування на основі їх лінеаризації дозволяють одержати тільки лінійні закони керування.

У той же час відомо, що нелінійні закони керування в багатьох випадках забезпечують кращу якість керування. Можливий аналітичний синтез систем керування за допомогою методу аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи. Однак цей метод припускає використання трудомістких ітераційних процедур розрахунків матриць коефіцієнтів і не повною мірою враховує обмеження, які накладаються на роботу тягових двигунів (ТЕД).

Із цього можна зробити висновок, що дослідження, спрямовані на вирішення наукової проблеми обґрунтування і розроблення методів формування ефективних параметрів керування тяговим електроприводом МВРС, 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).

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 чотириполосників і спектральної теорії сигналів; синтез ефективного приймача – на теорії оптимального 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 ППК 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, в публікаціях в яких відображено основні результати дисертації та які написані у співавторстві, здобувачу належать: [23] – розглянуті особливості побудови силової схеми й системи керування тяговим електроприводом дизель – поїзда, [44] – сформовано основні методологічні підходи щодо побудови структури індуктивно-дротового датчика, [75] – проведено синтез оптимальних керувань тяговим рухомим складом за допомогою системи керування у формі Бруновського й принципу максимуму Понтрягіна., [127] – запропоновано для контролю й діагностики систем керування ТЕП використовувати радіально-базисні нейронні мережі, [161] – проведено аналіз перспектив застосування сучасних інформаційних технологій на тяговому рухомому складі, [280] – сформовано ряд основних принципів, які покладено в основу аналізу електричних кіл при складних неперіодичних вхідних сигналах, [300] – формалізовано основні параметри щодо реалізації нейромережевої моделі динамічного логічного елемента, [303] – формалізовано процедуру оцінки стану рухомого складу за допомогою нейронних мереж, [343] – запропоновано з метою універсалізації підходу щодо побудови нейронної мережі та деякого спрощення процедури її навчання ввести обмеження, [345] – запропоновано виявляти зміни характеристик систем управління моторвагонного рухомого складу на основі аналізу таксономічного показника з використанням нейронних мереж, [346] - сформовано основні методологічні підходи щодо контролю в процесі експлуатації тягового рухомого складу, [349] – запропоновано модель контролю в процесі експлуатації тягового рухомого складу допомогою нейронних мереж, [350] – встановлено, що функціональна придатність моделі обумовлюється значеннями вагових коефіцієнтів та параметрами нахилу функцій збудження кожного нейрону, [351] – запропоновано процедуру реалізації моделі, [352] – сформовано ряд основних принципів, які покладено в основу підвищення точності обліку і контролю електроенергії вимірювальним комплексом, [382] – сформовано основні методологічні підходи щодо визначення економічної ефективності впровадження системи автоматичного регулювання та управління ТЕП, [386]] - розроблено аналітичну модель для реалізації електронного ключа, [387] – запропоновано підходи, щодо формування моделі датчика, [388] – сформовано модель динамічної нейронної мережі з модифікованим алгоритмом навчання, [389] – визначено основні параметри побудови моделей нейро - нечіткого функціонування автоматизованих систем керування.

Роботи - [15, 49, 77, 107, 120, 190, 267, 268, 269, 299, 301, 339, 340, 342, 344, 353, 356, 359, 362, 363, 383, 390] - написані автором самостійно.

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

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

2. На 22-й міжнародній конференції «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины» // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – м. Алушта.

3. На 23-й Міжнародній конференції «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины» // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010. – м. Алушта.

4. На 24-й Міжнародній конференції «Перспективні комп'ютерні, управляючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України» // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – м. Алушта.

5. На XIX Міжнар. наук.-практ. конф, 1-3 червня 2011 р. – Харків: НТУ «ХП».

6. На 25-й Междунар. конференції «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железных дорог Украины» // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2012. – м. Алушта.

7. На 74-й Міжнар. наук.-техн. конф. – Харків: УкрДАЗТ, 2012.

8. На III Міжнар. наук.-практ. конф. м. Тель-Авів (Ізраїль). – Луганськ: СУНУ, 2012 // Інноваційні технології на залізничному транспорті.

9. На V Междунар. науч.-практ. конф. – Днепропетровск: ДНУЖТ, 2012 // Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті.

10. На 26-й Междунар. научно-практ. конф. 2013 “Внедрение перспективных микропроцессорных систем железнодорожной автоматизации и средств телекоммуникаций на базе цифровизации” // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – м. Алушта.

Дисертацію в повному обсязі розглянуто та схвалено на розширеному засіданні кафедри «Електротехніка та електричні машини» УкрДАЗТ (м. Харків); на засіданні ради факультету комп'ютерних та інформаційних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», розширеному засіданні міжкафедрального наукового семінару кафедр електротехніка та електромеханіка, електрорухомого складу, електропостачання залізниць, автоматика телемеханіка зв'язок, електронних обчислювальних машин Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Публікації. Результати дисертаційної роботи відображено у 42 публікаціях, з них 25 у фахових наукових виданнях, що затверджені Міністерством освіти і науки України; 1 монографія, 1 підручник, 2 патенти на винахід; 3 патенти на корисну модель; 10 тез доповідей.

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 рисунки 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 сторінках.

Публікації – (77, 120, 190, 268, 269, 340, 342, 349, 353, 362, 389, 390) - включено до Російського індексу наукового цитування РІНЦ (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=33934) Видання ISSN 1681-4886. Зареєстровано 24 жовтня 2001 р. у Centre International de l'ISSN, 75002 PARIS, France.

Публікації – (299, 339, 344, 351, 363) - включено до збірників, що входять до міжнародної наукометричної бази «Index Copernicus» (<http://journals.indexcopernicus.com/passport.php?id=9147>)

Всі публікації задовольняють вимогам МОН України.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА КЕРУВАННЯ МОТОРВАГОННИМ РУХОМИМ СКЛАДОМ

1.1 Аналіз основних етапів розвитку систем автоматичного керування рухомих складом на залізничному транспорті

Наявна тенденція до концентрації робочих місць у містах при одночасному розосередженні працівників як на міській території, так і в приміській зоні обумовлює великі пасажиропотоки в міському та приміському громадському транспорті, особливо в години пік. В індустріальних містах України потребу в таких перевезеннях великою мірою задовольняє рейковий транспорт підвищеної швидкості – приміські поїзди (електричні та дизельні) і метрополітен. Як показав досвід, для великих міст потреба в пропускній спроможності метрополітену сягає для однієї лінії 48 пар поїздів на годину [1, 3] (цьому відповідає інтервал попутного прямування величиною 75 с), а інтервал попутного прямування електропоїздів приміського сполучення в середньому складає 240 с, при цьому мінімальна його величина, яка ще дозволяє забезпечувати рух поїздів за зеленими вогнями світлофорів, складає 180 с [2]. З цих фактів випливають два важливих наслідки:

1) безпека і стабільність такого інтенсивного руху можуть бути реалізовані тільки при суворому дотриманні з мінімально припустимими відхиленнями графіка руху поїздів (жорсткого або гнучко коригованого);

2) на лінії приміського сполучення або метрополітену водночас рухається велика кількість поїздів, кожний з яких є потужним споживачем електроенергії або палива, вартість яких безперервно зростає.

На безпеку і стабільність руху (як неухильне дотримання графіка руху) безпосереднім і очевидним чином впливають також технічні стани ходової частини рухомого складу та його гальм, а також тягових двигунів; обидва ці компоненти підлягають ретельному контролю [4-6]. Але прийємо до уваги, що такі безумовно невід'ємні складові діяльності транспорту, як експлуатація та ремонт рухомого складу, утворюють певною мірою самостійну науково-практичну галузь, шляхи взаємодії якої з галуззю забезпечення власне руху поїздів уже напрацьовані. Тож можна повернутися до розгляду двох сформульованих вище наслідків як питань, що в широких межах незалежні від проблем технічної експлуатації (причому не тільки рухомого складу).

Узагальнюючи ці наслідки, можна сказати, що обидва вони окреслюють проблему раціонального використання ресурсів: перший – часового ресурсу, унормованого у вигляді графіка руху поїздів, другий – енергетичного ресурсу, унормованого тяговими та економічними розрахунками. При цьому часові та енергетичні характеристики руху пов'язані між собою. Згідно з даними роботи [2] для електропоїздів приміського сполучення при довжині перегону 3 км зменшення часу руху перегоном на 30 с призводить до збільшення витрати електроенергії на 50 %, тоді як збільшення часу руху перегоном на 30 с забезпечує економію 25 % електроенергії порівняно з тяговим розрахунком. Загалом при середньостатистичній довжині маршруту 58 км збільшення часу ходу поїзда на 2 хвилини призводить до економії 8,5 % розрахункової кількості електроенергії. На метрополітені, згідно з даними роботи [7], поточне коригування часу руху поїзда кожною ділянкою перегону дозволяє

забезпечити в умовах експлуатації в середньому 5 % економії витрат електроенергії, що складає й велику абсолютну величину, оскільки згідно з тими самими даними вартість електроенергії, що витрачена на рух поїздів, складає від 70 до 80 % експлуатаційних витрат метрополітену. У той же час експериментальні дослідження показують, що людина-машиніст не здатна забезпечити точність і відтворюваність дій з ведення поїзда. Так, опитування кваліфікованих японських машиністів показало, що вони не можуть чітко сформулювати міркування, за якими вони забезпечують плавне гальмування потяга і точність його зупинки в заданій точці платформи [8]. Більш того, машиністи схильні гальмувати плавніше, ніж це обумовлює теоретично оптимальна залежність швидкості від часу при підході до платформи, або поїзда, що рухається попереду, або забороняючому сигналу [9, 10, 15]. Нарешті, деяка інформація, важлива для вибору режиму ведення поїзда, може бути недоступною для машиніста як, наприклад, прогноз часу звільнення складної ділянки шляху поїздом, який йде попереду [10].

Таким чином, за штатного інтенсивного руху поїздів людина-машиніст не здатна надійно забезпечувати режим ведення поїзда, при якому максимально використаний часовий ресурс руху за умови раціонального використання енергетичного ресурсу при беззаперечному дотриманні умов безпеки руху. Звідси випливає, що за описаних умов має місце недовикористання пропускної спроможності ліній при завищених витратах на здійснення існуючих перевезень. Це міркування є незмінною основою всіх існуючих і перспективних досліджень і розробок методів і пристроїв автоматичного регулювання та управління (АРУ) ТЕП моторвагонного рухомого складу, які є невід'ємною частиною систем автоматичного ведення поїздів (АВП).

Розглянемо більш детально вирішення першого отриманого наслідку. На вітчизняних залізницях і метрополітенах для визначення місцезнаходження поїзда переважно використовують неперервні колійні датчики у вигляді рейкових кіл і шлейфів [4, 10, 32, 34, 35, 44]. Визначене таким чином місцезнаходження має дискретний характер з просторовим інтервалом, який дорівнює довжині блок-ділянки. Така просторова структура лежить в основі систем інтервального регулювання руху поїздів і їх підсистем як таких, що вже тривалий час знаходяться в експлуатації (різні види автоблокування, АЛС, автоматичного регулювання швидкості АРС, автоматичного гальмування поїздів САУТ) [4, 10, 35, 36], так і досить нового комплексу локомотивних пристроїв безпеки КЛУБ, САУТ-Ц, САУТ-У [32, 37, 38] (у тексті наведено російськомовні аббревіатури як такі, що встоялися і дозволяють зберегти термінологічну спадкоємність). Система САУТ-У забезпечує рух з максимальною за умов безпеки швидкістю, зменшуючи швидкість до встановленої величини або до ділянки за траєкторією інтенсивного гальмування, при цьому машиніст отримує інформацію про різницю фактичної та припустимої швидкості в поточній точці шляху, про відстань до найближчого світлофора та про те, на яку колію станції буде прийнято поїзд.

Як дублюючий засіб отримання інформації про зайнятість блок-ділянок (а на малоділяльних ділянках – як єдиний засіб) знайшли застосування системи інтервального регулювання, базовані на точкових датчиках підрахунку осей рухомого складу [39]. Вони не використовують рейкову лінію і дозволяють не тільки контролювати зайнятість перегону, але й контролювати повносоставність прибуття поїзда на станцію без участі обслуговуючого персоналу. Відомими системами цього типу є УКП СО розробки Уральського відділку ВНИИЖТ [39-42], ЭССО та СИР-ЭССО на базі розробок Уральського державного університету шляхів сполучення (УрГУПС) [32-43]. Остання за даними роботи [43] може бути модифікована для використання в системах ПОНАБ та ДИСК-БКВ-Ц та КТСМ [4] для контролю теплового стану букс.

На сьогодні для швидкостей руху, що не перевищують 160 км/год, деякі з перелічених умов до систем безпеки руху відповідають класичному диспетчерському керуванню, що забезпечує (при дотриманні інших обов'язкових умов) виконання графіка руху [10], з універсальними ЕОМ та з пристроями диспетчерського контролю на пунктах диспетчерського керування, доповненими спеціалізованою колійною та локомотивною автоматикою. Це дозволяє для вказаних швидкостей контролювати місцезнаходження поїзда, його прямування, повносоставність і певні елементи його технічного стану.

Отже, можна констатувати поточну наявність технічних засобів, які для швидкостей до 160 км/год реалізують деяку частину наведених вище вимог до систем забезпечення безпеки руху та їх складових частин. З певними технічними зусиллями цей діапазон швидкостей вдалося розширити до 250 км/год, залишаючись на технічній базі тональних рейкових кіл, як це було зроблено при створенні фірмою Siemens системи EZS800 на базі АЛСН LZB700 [32, 45]. Однак для коригування даних щодо вимірів пройденого шляху при додаванні функції автоведення на доданок до АЛСН було використано вже точкову АЛС ZUB100 [45]. З виходом на колії (у тому числі колії загального користування) швидкісних поїздів проблема автоведення поїздів постала в усій повноті, оскільки швидкість реакції на зовнішні збурення і здатність здійснювати безпечно та оптимальне ведення поїзда людиною-машиністом на таких швидкостях незадовільні; в існуючих розробках передбачається передача керування людині лише в нестандартних ситуаціях [10, 45, 47, 49]; із зростанням швидкості та інтенсивності руху вагомість проблеми безпеки руху тільки підсилюватиметься [48]. Як наголошено в роботі [46], вимогу безпеки руху швидкісного тягового рухомого складу можна задовольнити лише на базі використання завадостійкої системи автоведення, основне інформаційне забезпечення якої складають сигнали автоблокування та АЛС. Питання передачі таких сигналів на рухомий склад має різні рішення, які будуть розглянуті дещо нижче. Близький до українського досвід російських розробників систем АРУ призвів до висновку про необхідність ієрархічно структурувати системи таким чином [49-51]:

- *нижчий рівень*: поїзні пристрої або бортові локомотивні пристрої;
- *середній рівень*: станційний лінійний пункт, або пристрої перегінної автоматики, розташовані на роздільних пунктах (колійних постах та ін.);
- *вищий рівень*: головний автоматизований центр, або диспетчерський центр управління, котрий має бути розташованим на одній з кінцевих станцій

Розподіл функцій між рівнями ієрархічної структури запропоновано визначати виходячи з переліку можливих режимів ведення поїзда, з пропускнуої спроможності каналу зв'язку між поїзними та напільними пристроями та з вимоги забезпечення живучості системи.

Близьку до наведених структур взяв за основу Японський національний інститут досліджень для залізничного транспорту. Розроблена система поєднує функції автомашиніста та автоматичного диспетчера [55]. Верхньою сходинкою системи є диспетчерський центр з керуючим комп'ютером, середньою сходинкою – колійні датчики, встановлені на кордонах блок-ділянок, нижчою – поїзні комплекти автоматики, зв'язку та виконавчих пристроїв.

Отже, на сьогодні склалася концепція автоматизованого керування рухом рейкового транспорту, яка полягає в ієрархічності як загальної структури системи керування рухом на полігоні, так і в ієрархічності самої системи АРУ.

1.2 Системи автоматичного регулювання та керування тяговим електроприводом рухомого складу

Найбільш відомою і широко впровадженою системою керування рухом поїздів на полігоні є програмно-апаратний комплекс ETCS (European Train Control System), який з 2005-2006 рр. знаходиться в комерційній експлуатації в Німеччині, Італії, Люксембурзі, Голландії, Швейцарії, Іспанії, пізніше – Бельгії, Австрії та Угорщині [52, 53]. Система ETCS, у свою чергу, разом із системою поїзного радіозв'язку GSM-R є складовою частиною Європейської системи управління залізничними перевезеннями ERTMS [53]. З 2000 р. Міжнародний союз залізниць UIC запропонував відкриту угоду про уніфікацію систем руху поїздів (у Європі вже реалізована як ETCS та ERTMS) включаючи апаратну частину: колійні пристрої СЦБ, обладнання, що монтується в кабінах електропоїздів, та апаратуру АЛС (включаючи системи регулювання швидкості та автостопа) [54]. Створення САВП з урахуванням регіональної специфіки залізниць України і Європи дозволить інтегрувати українську залізничну перевізну систему до європейської та надасть залізницям України зручні умови для залучення своєї частки пасажиропотоків. Поки що, незважаючи на наявність низки нормативних і регулюючих державних документів [56, 57], має місце суттєве відставання навіть від Росії та Білорусі, де практично весь парк електропоїздів обладнаний системами АВП [58].

Метрополітени, з огляду на їх територіальну ізольованість, є менш стандартизованим сегментом галузі пасажирських перевезень. Це обумовило певну відокремленість розробок систем автоматизації метрополітенів від аналогічних систем для магістральних доріг і приміських перевезень, хоча розробниками нерідко виступали одні й ті самі організації – наприклад, ВНИИЖТ та МИИТ [12, 26, 49, 59]. Звичайно ж, мають вплив і суттєва специфіка руху поїздів, розвиненість мережі, характер пасажиропотоків, інженерні споруди та умови роботи й інші фактори, притаманні метрополітенам. Для отримання цілісної картини місця систем АВП у метрополітені та порядку і обсягу їх взаємодії з суміжними системами розглянемо кілька діючих комплексів. Так, на римському метрополітені [20] існує Центр управління рухом (ЦУР), що керує напільними пристроями СЦБ, здійснюючи функцію телекерування сигналами згідно з маршрутами та графіком руху, отримуючи щодо кожного поїзда інформацію про його номер, час перебування на шляху прямування, про проходження кожної блок-ділянки, про місце, час і тривалість зупинок. ЦУР також здатний автоматично прокладати маршрути прямування та забезпечувати телекерування стрілками при зміні маршрутів, а в разі необхідності – перевести всю систему в режим автономного ведення поїздів, в якому кожен поїзд реалізує дії щодо графіка, режимів руху, зупинок самостійно, а часові та просторові співвідношення між поїздами визначає система інтервального регулювання. Згідно з даними роботи [20] програмні фрагменти ЦУР та комплекти напільного обладнання утворюють дві системи – автоматизовану систему ведення поїздів (АСВП) та автоматизовану систему управління рухом (АСУР). АСУР містить в собі підсистему керування напільними пристроями СЦБ, підсистему приймання та відображення номерів поїздів і станцій призначення та підсистему, що забезпечує зв'язок поїздів з напільними пристроями. АСВП через підсистему локомотивної сигналізації надає машиністові сигнали про зайнятість блок-ділянок, отримані з напільних пристроїв. Цими сигналами кодуються дискретні величини швидкості, дозволеної згідно з алгоритмом забезпечення безпеки руху.

З точки зору фахівців ВНИИЖТ, МИИТ, інституту Гипротрансигнальсвязь та Харківського метрополітену [11, 12, 23, 60, 61] була розроблена структура та порядок взаємодії систем автоматики, призначених для керування поїздами метрополітену.

Комплексна система САОБДПМ («Система автоматизации и обеспечения безопасности движения поездов метрополитена») складається з двох систем – САУДПМ («Система автоматического управления движением поездов метрополитена») і СОБДПМ («Система обеспечения безопасности движения поездов метрополитена»). Команди останньої мають найвищий пріоритет, їх формують і виконують чотири групи пристроїв.

Власне рухом кожного з поїздів керує САУДПМ, котра на сьогодні та в перспективі є централізованою, тобто такою, що складається з системи диспетчерського управління (СДУ), системи АР, яка здійснює локальні щодо поїзда виконавчі та вимірювальні (як можливість – ще й діагностичні) [62, 63

] функції, і системи інтервального регулювання руху поїздів СИРДП, котра є спільним фрагментом із СОБДПМ. Останній факт призводить до того, що самі принципи побудови системи АРУ та її розвиненість залежать від алгоритмів роботи пристроїв інтервального регулювання [12].

Як вже було зазначено в даній роботі, система АРУ може бути автономною, взаємодіючи з СОБДПМ тільки через СИРДП, і централізованою, тобто такою, що входить до складу централізованої САУДПМ і веде поїзд, керуючись зведеною інформацією про параметри руху всіх поїздів на лінії та згідно зі зведеною програмою організації руху на лінії. Централізована система потенційно здатна забезпечити більшу точність додержання режимів ведення поїзда і, як наслідок, графіка руху, аніж автономна [3, 12]. Її загальна структура повторює структуру систем АР електропоїздів, описану в даній роботі вище, тобто є ієрархічною трирівневою [12, 22]. Функції централізованої системи можна поділити на керуючі та інформаційні [65].

Умови експлуатації в кожному конкретному випадку можуть вносити певні корективи до номенклатури та розподілу функцій. Так, наприклад, до функцій об'єднаної системи автоматичної локомотивної сигналізації АЛС з автоматичним регулюванням швидкості АЛС, яка отримала назву АРС-Е, згідно з даними роботи [14], належить організація всіх переміщень поїздів включаючи рух у тупикових вітках, коліях і канавах депо та по відхилених стрілкових переводах. Певним обмежуючим фактором при перерозподілі функцій є вимога забезпечення живучості системи, що стосовно систем АР означає забезпечення хоча б функцій автоведення в умовах виходу з ладу центру управління рухом, станційних пристроїв і (або) каналів зв'язку [11], з огляду на те, що в 2003 р. було запропоновано надати поїзному пристрою системи АРС-Е функцій автоведення [66].

Розглянуті структури, можливості реалізації, номенклатура та розподіл функцій САВП дозволили скласти їхню класифікацію, наведену на рисунку 1.1.

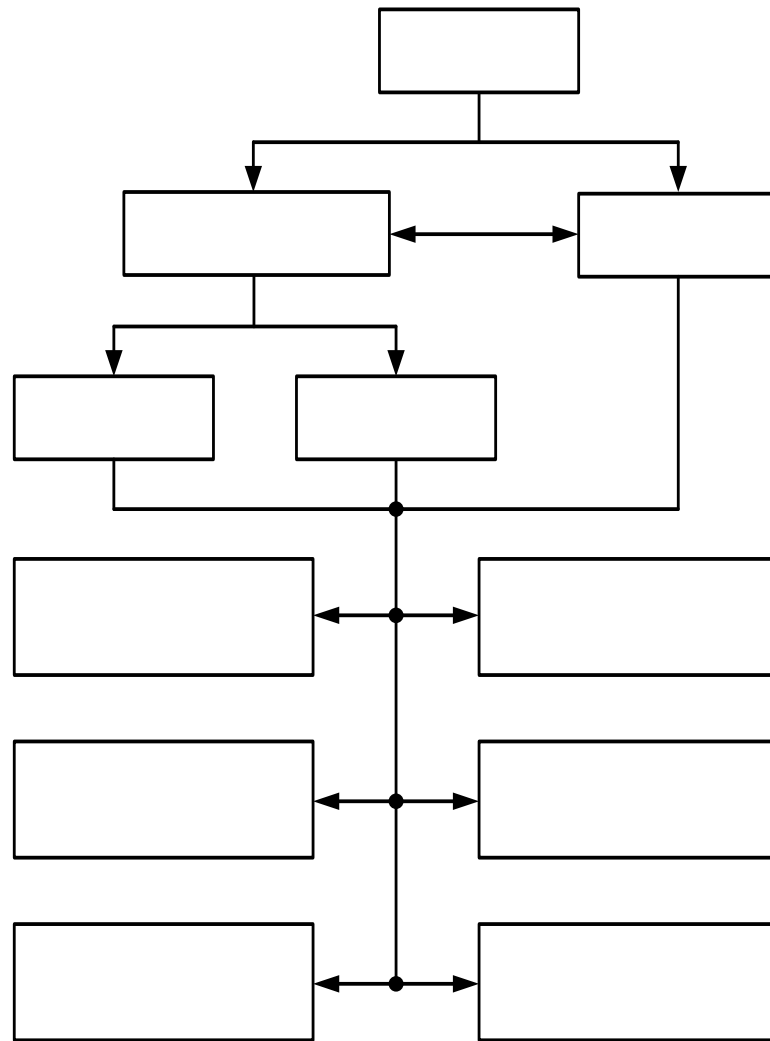


Рисунок 1.1 – Класифікація систем автоматичного ведення поїздів

Системи АВП з незмінними програмами руху керують поїздом за законом, встановленим однією з кількох заздалегідь розрахованих програм руху; корекція ведення поїзда можлива тільки в межах вибору з цих кількох програм [12, 67]. Системи АВП з поточним розрахунком програм руху, спираючись на задані заздалегідь або отримані по каналу зв'язку час проходження контрольних точок шляху та допустимі швидкості на ділянках шляху на базі вимірних поточних параметрів руху, коригують вид (можливо й інтенсивність виконання) використовуваних режимів руху, реалізуючи зазвичай стратегію досягнення екстремуму деякого експлуатаційного показника – мінімуму енергоспоживання, максимуму точності виконання графіка руху, найменшої похибки прицільного гальмування і т. ін.

Практично всі діючі нині системи АВП належать до цього типу; реалізовані ними критерії вибору управління будуть більш детально розглянуті нижче. Програми руху можуть бути фізично розташовані на борту локомотива або надходити до бортового керуючого обладнання з незмінних міжрейкових шлейфів (при використанні незмінних програм руху) [44, 68, 387] або напільних випромінювачів [69, 70], або з інших засобів бездротового

зв'язку, котрі також будуть розглянуті нижче.

Одноконтурні системи АВП відпрацьовують регулювання тільки однієї величини – часу ходу. Як вхідне збурення системи регулювання використовується різниця між запрограмованим і фактичним часом проходження встановлених точок шляху, відповідно до якої коригується режим ведення поїзда.

Двоконтурні системи АВП обов'язково включають у себе обладнання регулювання (а інколи і стабілізації) швидкості. Вхідне збурення таких систем – те саме, але система спочатку намагається скоригувати той самий час ходу за рахунок зміни швидкості без зміни режиму ведення поїзда (тяга, вибіг, гальмування) [12, 71].

Отже, сучасні системи АВП будують централізованими з трирівневою (рідше дворівневою) ієрархічною структурою. Між рівнями такої структури в робочому режимі циркулюють великі потоки інформації. Зв'язок між стаціонарним обладнанням вищого та середнього рівнів не являє собою принципової технічної проблеми і, як правило, забезпечується через традиційні електричні або оптичні кабельні лінії зв'язку [10]. Обмін інформацією між поїздом і стаціонарним обладнанням донедавна здійснювався більш притаманним саме системам залізничної автоматики та телемеханіки способом – через рейкові кола або шляхові шлейфи [16, 20, 35, 68, 69, 72, 73]. Такий канал має низьку центральну частоту та вузьку смугу пропускання, тому швидкість передачі даних, котра є величиною прямо пропорційною їй [74, 75], за такого способу зв'язку невелика – від одиниць біт за секунду [4, 69, 76] до кількох сотень біт за секунду [20]. Це суттєво обмежує кількість можливих різновидів керуючих команд і додаткових (контролюючих виконання та діагностичних) сигналів. При збільшенні центральної частоти системи зв'язку зростає й доступна для використання ширина смуги частот [77], тому більш сучасні системи використовують достатньо високочастотні канали радіозв'язку – як спеціально розроблені для певної залізниці [17, 55] на базі напільних пристроїв, так і уніфіковані на базі загальнодоступних систем супутникового зв'язку діапазону 900 МГц [78]. Відбувається також активне впровадження системи поїздного радіозв'язку GSM-R [53, 79, 80] як засобу забезпечення дії основного каналу зв'язку між поїздом і напільними пристроями. На лініях швидкісного руху в останні 20 років знайшли широке застосування точкові пристрої обміну інформацією та забезпечення безпеки руху [32, 45], які після загальноєвропейської стандартизації отримали назву «євробалізи». Конкуренцію останнім у наш час починають складати супутникові системи місцевизначення та зв'язку [81].

На метрополітенах, які мають переважно підземний колійний розвиток і є недосяжними для супутникового сигналу, значну частину складають рейкові кола та шляхові шлейфи, при користуванні якими, наприклад для цілей системи дистанційного управління гальмуванням, рівень завад на вході приймача дуже високий [82]. У свій час мали місце спроби впровадити інфрачервоний канал зв'язку [83], але усталеного продовження не знайшли.

Досліджувалося також питання обміну оперативною інформацією між поїздом і напільним обладнанням за надвисокочастотним радіоканалом [70]. Кількісні оцінки, отримані за цими дослідженнями, показали, що за час $7,2 \cdot 10^{-2}$ с можна передати в одному напрямку 4800 біт інформації з імовірністю помилки менш ніж 10^{-10} .

Як свідчить більш ніж 50-річний досвід розроблення та експлуатації систем АВП [2, 11-13, 16, 20, 21], з огляду на взаємопов'язаність елементів перевізного процесу вони обов'язково повинні бути інтегрованими до вищої за функціональним навантаженням системи керування, тобто система АРУ неодмінно являє собою певну нижчу сходинку деякої ієрархічної керуючої структури, яка перш за все забезпечує пріоритет безпеки руху [10, 22], а потім тією чи іншою мірою охоплює й інші боки перевізного процесу [23]. Розглянемо можливі варіанти такої інтеграції, а також вид, порядок та обсяг взаємодії системи АВП як сходинки ієрархічної структури керування.

Розроблений в 1957 р. перший у тодішньому СРСР автомашиніст приміського тягового рухомого складу та випробувана в 1961 р. на Московському метрополітені система АРУ були створені в Науково-дослідному інституті керуючих обчислювальних машин (Москва) [11, 12, 21] у вигляді так званих автономних систем. Термін «автономна система АР» означає, що вона керує тільки одним поїздом, на борту якого вона власне й встановлена. Вихідними даними для такої системи є розміщені в її пам'яті дані про графік руху, тягові характеристики поїзда, швидкісні параметри перегонів, закон керування рухом. По каналах зв'язку до автономної системи АРУ надходить інформація про поточне місцезнаходження поїзда, поточне обмеження швидкості та час, що залишився до прибуття на наступну станцію. Автомашиніст зразка 1957 р. оперував ресурсом часу, коригуючи різницю між плановим і виконаним графіками руху між зупинними пунктами [12]. Інформація про місцезнаходження поїзда, який прямує попереду, і про поїзну ситуацію надходила опосередковано у вигляді сигналів автоблокування. Оперування ресурсом часу здійснювалося шляхом регулювання сил тяги та гальмування, а також часу знаходження поїзда в цих режимах і в режимі вибігу.

Більш досконалу автономну систему АРУ було розроблено і на початку 1990-х рр., впроваджено Всесоюзним НДІ залізничного транспорту (ВНИИЖТ) на приміському тяговому рухомому складі підмосковного депо Куровська під назвою САРЭ [2, 13, 24]. Пам'ять цієї системи містить не тільки час проходження за графіком по контрольних станціях, але й характеристики перегонів і добірку координат ділянок з постійно діючими швидкісними обмеженнями. САРЭ варіює інтенсивність розгону поїзда залежно від профілю та довжини перегону (в умовах приміського сполучення під перегоні розуміється ділянка між сусідніми зупинними пунктами), а також залежно від співвідношення між розрахованою та фактичною швидкістю [2]. Принцип автономності, закладений в описані та проміжні розробки ВНИИЖТ для електропоїздів приміського сполучення, мав до середини 1990-х рр. те практичне підґрунтя, що за відсутності потужних і

доступних ЕОМ і швидкісних каналів зв'язку з рухомим складом слід було забезпечити співіснування на одному і тому самому полігоні автоматично керованих приміських поїздів і вантажних і пасажирських поїздів, у яких ручне керування сполучалося із простими системами інтервального регулювання (автоблокування, автоматична локомотивна сигналізація) [10, 12]. Однак за останні 15 років доступність, робочі та експлуатаційні характеристики як ЕОМ загального призначення, так і спеціалізованих керуючих ЕОМ і контролерів обумовили поступове впровадження автоматизованого керування також і вантажними та пасажирськими поїздами [25-30]. Це призвело до перегляду вимог до систем забезпечення безпеки руху в цілому та до їх складових частин [31-33].

Підсумовуючи матеріали попередньої частини даної роботи, зазначимо, що було визначено власне поняття системи АВП як такої, а також місце цієї системи в системі здійснення перевізного процесу, перш за все тягового рухомого складу приміського сполучення та поїздами метрополітену. Для створення цілісної картини функціонування системи АВП тепер слід розглянути об'єкти, якими вона безпосередньо керує (перш за все – визначити їх перелік і основні характеристики), встановити, якими каналами здійснюється це керування та за якими законами воно здійснюється.

Як видно з функціонального визначення системи АВП, наведеного на початку даного розділу, ця система забезпечує власне фізичний рух поїзда з керованими варіаціями параметрів цього руху. Тобто система реалізує певну послідовність керуючих рухом дій [84], коригуючи ці дії відповідно до видів і величин розбіжностей між встановленими та досягненими результатами. Практика показала наявність деяких функціональних відмінностей таких систем залежно від типу поїзда – пасажирський, вантажний, поїзд приміського сполучення, поїзд метрополітену [12, 18], однак в загальному вигляді завдання одне: треба забезпечити певний рух сукупності з'єднаних між собою рухомих одиниць, деякі з яких є тяговими, за певних властивостей тягових двигунів, певних властивостей їх живлення, при заданих профілі колії та умовах взаємодії рухомих одиниць з нею, користуючись заданою сукупністю можливих впливів на вказаний рух. Адекватна цьому завданню модель системи АВП повинна враховувати всі ці фактори, але опублікованих результатів спроб створити таку комплексну модель дуже мало [85], а з урахуванням додаткової вимоги ідентифікації об'єкта управління в реальному масштабі часу [26] слід констатувати відсутність таких моделей взагалі. Можна відмітити лише міркування загального порядку, які полягають в тому, що типові закони управління (пропорційний, пропорційно-диференційний, пропорційно-інтегрально-диференційний) не враховують достатньою мірою варіації параметрів реальних об'єктів управління, у тому числі протягом часу експлуатації [86]. А отже, для створення цілісної картини об'єкта, керованого системою АВП, розглянемо складові наведеної вище узагальненої задачі функціонування цієї системи.

Спочатку звернемо увагу на сам поїзд. Згідно з класичними поглядами [87-89] поїзд є лінійною сукупністю точкових мас рухомих одиниць, кожна з

яких з'єднана з двома сусідніми пружними зв'язками (за винятком першої та останньої рухомих одиниць поїзда). На кожну з мас при русі діють сили тяги, сили опору та гальмівні сили.

Класичне рівняння руху поїзда, виведене на базі законів механіки Ньютона, враховує також кінетичну енергію, що запасена в обертових масах (переважно в колісних парах) за допомогою деякої сталої . Кінцевий вигляд цього рівняння згідно з роботою [87] є таким:

$$m \frac{dv}{dt} = F - W - B \quad (1.1)$$

де $f(v)$ – питома сила тяги, кН/т;
 $w(v)$ - питомий опір руху поїзда, кН/т;
 $b(v)$ - питома гальмівна сила, кН/т.
 t – час, год.

Розв'язання цього рівняння при складному характері зміни швидкості в часі, маси в часі та виду

залежностей , , під час проходження (зміна погодних умов і властивостей рейок, зміна напруги в контактній мережі і т. ін.) роблять розв'язання рівняння (1.1) в реальних умовах експлуатації нетривіальною задачею, а розв'язання сукупності задач обох видів динаміки поїзда – великою комплексною проблемою, вирішення якої вимагає творчих зусиль цілих наукових шкіл [90]. Повертаючись до рівняння (1.1), зазначимо, що дослідженню окремих його компонентів і пошуку його розв'язків для різних умов експлуатації присвячено багато робіт дослідників; при цьому характер зроблених припущень визначається характером задачі, у рамках якої виникла необхідність у розв'язанні рівняння руху поїзда. Так, у роботі [91] при формуванні енергорационального закону управління тягою состав було розглянуто як зосереджену масу, тоді як у роботі [92] при дослідженні руху неоднорідного поїзда його розглянуто як лінійну механічну систему. Складному випадку нестационарних повздовжніх процесів у поїзді присвячено роботу [93], показано визначальний вплив, який на ці явища мають дві механічні хвилі, що виникають попереду та позаду вагона, який знаходиться в середній частині поїзда. У роботі [94] наведено аналітичний метод вирішення рівняння руху поїзда, що забезпечує нескладне визначення деяких характеристик, потрібних для тягового розрахунку. Низка робіт присвячена вивченню закономірностей, реалізованих окремими доданками рівняння (1.1). Так, у роботі [95] розроблено математичну модель тягової одиниці з урахуванням її впливу на величину та характер взаємодії динамічних сил, що виникають при тязі та гальмуванні, а роботу [96] присвячено вивченню кінематичного опору руху поїзда, у роботі ж [97] розглянуто питання врахування профілю колії на основні параметри руху поїзда при заданій силі тяги. Значну увагу фахівці з тяги та динаміки поїзда приділяють фізичним та експлуатаційним аспектам взаємодії колеса та рейки [87-89, 98], оскільки ця взаємодія визначає можливість здійснення тяги та гальмування. Боксування, однією з причин якого є невідповідність обертового моменту колеса тягової одиниці та сили його зчеплення з рейкою, призводить до недовикористання сили тяги електропоїздів і моторних вагонів [87, 89]; ефективним засобом боротьби з боксуванням визнано індивідуальне керування колісними парами або мотор-колесами тягових одиниць [99-101, 107]. Інший аспект взаємодії колеса та рейки – гальмування – традиційно здійснюється або механічними гальмами з тертям гальмівних колодок об бандаж колеса, або електричним способом, при якому тягові електродвигуни перемикаються в режим гальмування [102-104], або застосуванням рейкових гальм [105, 106].

Як впливає з робіт фахівців, що мають багаторічний досвід розроблення, конструювання та впровадження систем АРУ [11, 12, 19], неможливо визначити функцію водночас всіх цих критеріїв, оптимізація якої забезпечила б раціональні числові значення кожного з них. Тому задачу досягнення мети керування, строго кажучи, слід розглядати як задачу обґрунтованого вибору з множини альтернативних сукупностей числових критеріїв (надалі – просто «альтернатив») і такої альтернативи, котра при заданій системі переваг є кращою, аніж ті альтернативи, котрі не було обрано. Така задача отримала в літературі назву задачі багатокритеріальної оптимізації [133]. При веденні поїзда машиністом останній є особою, що приймає рішення, керуючись сигналами, інформацією про характеристики поїзда, профіль і стан колії, обмеження швидкостей відповідно до вимог нормативних документів. Усе це є вхідною інформацією особи, що приймає рішення. У класичному випадку альтернативами, серед яких вибирає ця особа, є позиції контролера машиніста як апарату комплексного керування рухом поїзда. При використанні в конструкції поїзда виконавчих апаратів з груповим приводом кількість позицій контролера дорівнює 10...20 [134], а при використанні індивідуальних контакторів ця кількість сягає 50...75. У комбінації з варіаціями часу ввімкнення одразу кілька позицій контролера відповідають виконанню машиністом ведення поїзда в рамках

нормативних вимог при цьому, однак, маючи один чи кілька побічних небажаних наслідків, як, наприклад, підвищена витрата енергії на тягу, підвищений знос гальм, некомфортність використаних прискорень (уповільнень) для пасажирів і т. ін. Зараз можна прийняти певний перелік критеріїв, за якими система АРУ оптимізує рух поїзда:

- мінімум енергоспоживання на тягу;
- точність виконання часових параметрів руху в цілому або його окремих фрагментів;
- точність прицільного гальмування;
- точність дотримання заданої швидкості поїзда;
- забезпечення мінімально можливого безпечного просторового інтервалу між сусідніми поїздами.

Розглянемо теоретичні та практичні аспекти систем АРУ, базованих на перелічених критеріях.

Аналіз літературних джерел показав, що найбільшого застосування на практиці знайшли системи АР, які забезпечують мінімальну величину електроенергії, спожитої на тягу. Класичний тяговий розрахунок

проводиться на базі розрахунку залежності швидкості руху поїзда як функції часу проходження t і як функції пройденого шляху s , а також розрахункової залежності t часу ходу від пройденого шляху [87, 89]; ці функції отримали назву кривих руху поїзда. На їх базі визначають величини струму, споживаного поїздом у кожний момент часу, числові показники використання потужності електродвигуна складу та системи енергозабезпечення, а також поточну температуру обмоток тягових електродвигунів. За цими показниками обчислюють кількість електроенергії, спожитої поїздом визначеного маршруту. Саме цю величину або її складові – величини енергії, спожитої при русі кожним окремим перегонном – мінімізують при енергооптимальному автоведенні поїзда.

До найбільш поширених належать системи АРУ, які мінімізують спожиту на тягу електроенергію за

умови забезпечення заданого часу проходження t перегонном [12, 77, 135-139] та оптимальним розподілом на ділянках часу проходження перегонном [7], як варіант – забезпечення графікового часу про прямування контрольних станцій приміського сполучення [2, 13, 140]. Ці часові характеристики, що в даній задачі оптимізації відіграють роль обмежень, задовольняють вибір належного режиму ведення (тяга, вибіг, гальмування) і належного часу ввімкнення даного режиму, причому в режимі тяги можуть бути доступними одна швидкість ведення [11, 12, 141], дві швидкості ведення [135] або (хоча б принципово) плавно регульована швидкість ведення [130]. Відомі роботи, в яких розглянуто питання врахування профілю шляху при розв'язанні задачі мінімізації енерговитрат [44, 77, 142, 143] і стану найближчого автотранспортного переїзду [144]. Регулювання швидкості (а відтак – і часу) руху поїзда в режимі тяги здійснюють або перемиканням груп тягових двигунів [87, 130, 145], або плавним регулюванням їхніх електромагнітних моментів [130]. У режимі гальмування частину витраченої на тягу енергії повертають до живильної мережі, використовуючи рекуперативне гальмування, при якому тягові двигуни працюють у генераторному режимі [110, 130, 146, 147]. Додатковим лімітуючим фактором при тязі та гальмуванні можуть бути граничні величини повздовжніх сил у складі поїзда [19, 27]. Низка робіт присвячена енергорегулюючому блоку системи АР [148, 149]. Сукупність вироблених і зареєстрованих системою даних дозволяє також коригувати швидкість поїзда з урахуванням зупинки або зменшення швидкості поїзда, що прямує попереду [10, 150]. Це забезпечує можливість уникнути зайвих зупинок поїзда, які найбільш несприятливі з енергетичної точки зору при їх здійсненні на підйомах; у цілому ж таке прогнозує коригування забезпечує також підвищення швидкості поїзда на перегоні, що створює регулюючий швидкісний запас при коригуванні часу проходження прогоном.

Власне задача енергорационального ведення поїзда формується таким чином [12, 151]. Нехай

– квазіпостійна напруга на струмоприймачі локомотива (або залежність діючого значення тієї самої напруги від часу при тязі змінного струму), I – квазіпостійний тяговий струм (або залежність діючого значення тягового струму від часу), t – час проходження перегонном. З урахуванням введених позначень енергія, спожита на тягу за цей час, дорівнює

(1.2)

припускаючи, що рекуперация не здійснювалася. Цю енергію застосовано для створення сили тяги F , яка являє собою керуючу дію. Іншою доступною системі керуючою дією є сила гальмування

. Вважатимемо додатково, що електропривод і гальмівна система є безінерційними. Зберігаючи введені вище позначення v для миттєвої величини швидкості в момент t та s – для шляху, пройденого на той самий момент, а також F для питомої сили опору руху поїзда, додамо до них сумарну вагу тягових одиниць і решти поїзда в цілому, включаючи вантаж.

Нехай шляховими координатами початку та кінця перегону є відповідно s_0 та s_1

, а величини швидкості в тих самих точках шляху (тобто в ті самі моменти часу)

дорівнюють відповідно v_0 та v_1 . Ці чотири величини складають граничні умови для розв'язання системи (1.9), (1.10) диференціальних рівнянь. Також враховують, що при кожній конкретній величині s пройденого шляху швидкість повинна задовольняти діючі на лінії обмеження, тобто

$$v \leq v_{\max} \quad (1.3)$$

Можливості здійснення керуючих дій лімітовані так званими обмеженнями, накладеними на керування:

$$v \leq v_{\max} \quad ; \quad F \leq F_{\max} \quad . \quad (1.4)$$

Задача енергорационального ведення поїзда за введених позначень має таке формулювання:

визначити такі часові залежності керуючих дій v і F і відповідні їм траєкторії s і t , котрі забезпечують мінімальне споживання електроенергії при забезпеченні заданого часу проходженням перегонів, забезпеченні відповідності граничним умовам руху та дотриманні обмежень, накладених на швидкість і керуючі дії. Оскільки величина v , яка підлягає мінімізації, залежить від струму I , який, у свою чергу, є функцією часу t , визначеною відповідно до сили тяги F , котру необхідно створити в даний момент часу t , то маємо, що v залежить від керованого вибору функції F , тобто v є функціоналом [12, 152]. Наявність умов та обмежень визначає клас розв'язуваної задачі як задачі на умовний екстремум, а нелінійність входження швидкості v в доданки рівняння (1.10) робить її ще й нелінійною.

З'являється також нове рівняння, яке пов'язує диференціал шляху ds в кожній точці перегону з величиною швидкості в цій точці і називається ізопериметричною умовою [12]:

$$ds = v dt \quad (1.5)$$

Оскільки ж $v = ds/dt$, то функціонал (1.8) набуває вигляду

який з причини пропорційності сили тяги струмові [130] при визначальному коефіцієнті корисної дії в даному режимі тяги перетворюється на пропорційну величину

(1.6)

Траекторіями руху поїзда тепер будуть функції та , формулювання ж задачі мінімізації залишається, у цілому, попереднім, з урахуванням заміни аргументу на аргумент та необхідності додержання ізопериметричної умови (1.5). У роботі [12] наведено досить детальний і вичерпний (на той час) огляд варіантів розв'язання сформульованої задачі, які відповідають конкретним умовам здійснення тяги, додержання графіка руху та врахування профілю колії. Арсенал методів розв'язання на той час включав до себе традиційну оптимізацію скалярної функції кількох змінних [152, 153], застосування принципу максимуму Понтрягіна [75, 154, 161] і динамічне програмування Беллмана [155]. У подальшому до цієї вже відомої сукупності методів [30, 91] додалися багатокритеріальна оптимізація [19, 156], застосування апарату нечітких множин при формуванні рішень [8, 157] і регулювання за спадковими алгоритмами [158]. Звернення до цих нових методів стало можливим завдяки розвитку апарату матричних обчислень у теорії автоматичного управління [112, 159], методів нечіткої логіки [160], методології нейромережних структур [161, 162] і реалізації теоретичних напрацювань [163, 164] у галузі мікропроцесорних контролерів і спеціалізованих великих інтегральних схем, зокрема систолічних процесорів [165, 166].

Тепер розглянемо системи АР, у яких віддано пріоритет найвищій точності виконання часових параметрів руху в цілому або його окремих складових. У роботі [46] описано відмовостійку систему автоведення швидкісного тягового рухомого складу, яка на базі отриманих сигналів автоблокування та АЛС реалізує заданий графік руху поїзда за допомогою керуючої апаратури, розташованої на борту локомотива. Централізовану систему АР-900 інтервального регулювання та автоведення поїзда приміського сполучення, здійснення роботи якої суто автоматичне, без використання поїзних бригад описано в роботі [72]. Запатентовано систему АР, в якій основний технічний результат полягає в підвищенні точності виконання графіка руху поїзда при виборі режиму руху із змішаною витратою електроенергії [167]. Також запатентовано систему АРУ, яка забезпечує заданий час прибуття поїзда на кінцевий пункт знов-таки при зменшенні витрат енергії на тягу [168]. Примітною рисою цієї системи є те, що починаючи з розгону поїзда за його реакцією на заданий режим управління бортовий комп'ютер обчислює питому силу опору руху поїзда, переобчислюючи її при кожній зміні режиму управління. Тобто ця система додатково виконує функцію ідентифікації об'єкта керування [169, 170], що беззаперечно сприяє підвищенню якості керування.

Класичним прикладом системи АРУ, метою роботи якої за безумовного виконання умов безпеки є додержання графіка руху поїздів стала комплексна система управління поїздами метрополітену КСАУПМ, розроблена інститутом Гипротрансигнальсвязь (ГТСС) в 1970-х рр. для Ленінградського метрополітену [3, 10, 12]. Вона може працювати у двох режимах: без регулювання відхилень від графіка руху та з регулюванням цих відхилень. У першому режимі час відправлення поїзда зі станції дорівнює часу його прибуття на станцію плюс нормативний час, відведений на висадку та посадку пасажирів і технологічні операції, пов'язані із відправленням поїзда. У другому режимі час відправлення поїзда зі станції вираховують виходячи з часу відправлення з цієї самої станції поїзда, що прямує попереду, і часу відправлення з попередньої станції поїзда, що прямує позаду, а також з величини часового ресурсу, яка доступна шляхом регулювання швидкостей руху поїздів на перегонах, які суміжні з даною станцією. Таким чином, КСАУПМ є графіково-інтервальною системою за класифікацією, встановленою в роботі [12].

Різновид графіково-інтервальної системи розглянутий у роботі [11]. Така система формує керуючі дії відповідно до певної узагальненої в масштабах лінії величини, а саме – суми квадратів різниць між

фактичними і графіковими часами прибуття всіх поїздів лінії до платформ:

(1.7)

де n – кількість поїздів;
 m – кількість платформ.

Оскільки величина n змінюється в часі відповідно до ситуації на лінії, то керуючі дії системи, націлені на мінімізацію величини n , постійно підлаштовуються під поточну ситуацію; тому автори назвали цю систему адаптивною. У ній два керуючі контури – регулятор часу ходу на базі стаціонарного комп'ютера пункту диспетчерського керування та бортовий регулятор швидкості.

У системах автоведення електропоїздів приміського сполучення як вхідну величину використовують різницю між фактичним і графіковим часом ходу по контрольних станціях [2, 12, 13] і здійснюють керування регулюванням часу стоянки та часу проходження між зупинними пунктами (застосований до цього виду поїздів відрізок шляху між зупинними пунктами теж прийнято називати перегонем). Згідно з даними роботи [12] використовують такі закони керування рухом:

- 1) регулювання часу руху поїзда під струмом I як функції часу t ходу руху перегонем;
- 2) регулювання довжини шляху L , пройденого під струмом, як функції величини I ;
- 3) регулювання часу руху під струмом від контрольної точки як функції величини I ;
- 4) регулювання швидкості в момент переходу на вибіг як функції від I ;
- 5) регулювання середньої швидкості на момент ввімкнення тягових двигунів як функції I ;
- 6) для двоконтурних систем АРУ-регулювання заданої швидкості та шляхової точки переходу на

вибіг як функції величини I .

Отже, можна констатувати наявність та практичну і теоретичну апробованість деякої усталеної сукупності систем АР, які забезпечують дотримання заданих часових параметрів руху.

Вимога забезпечення високої точності прицільного гальмування характерна перш за все для метрополітенів і обумовлена дуже обмеженими габаритами платформ: відхилення від заданого місця

зупинки на станції з відкритою платформою не повинно перевищувати Δx м, а на станції із закритою

платформою не повинно перевищувати Δx м [3, 10]. Як варіант забезпечення гнучкості формування завдання на прицільне гальмування відмітимо алгоритми адаптивної зміни точки прицільного гальмування, який забезпечує її підлаштування під поточну поїзну ситуацію згідно з характером руху (станція, перегін, депо і т. п.) [171].

Питання забезпечення заданої точності прицільного гальмування тісно пов'язане з точністю реалізації розрахункового режиму гальмування [9, 171] і з точністю підтримання швидкості руху як початкової умови для гальмівних розрахунків [87] і як одного з критеріїв функціонування АРУ, синтезованої на базі комплексного, багатокритеріального підходу [19]. Існують дослідницькі напрацювання та розробки щодо виведення поїзда на задану швидкість і її стабілізації в заданих межах, які, у принципі, забезпечують її поточне коригування та підтримку її величини з більшою точністю, ніж це дозволяє оперування динамікою руху в рамках прийнятої на метрополітенах і поїздах приміського сполучення трійки режимів «тяга-вибіг-гальмування». Так, у роботі [172] розглянуто можливості визначення оптимальної точності підтримки заданої швидкості при ступінчастому керуванні силою тяги, а в роботі [59] – моделі та характеристики системи автоматичного управління швидкістю електрорухомого складу при використанні неперервного керування силою тяги. Відоме також запатентоване технічне рішення задачі регулювання потужності тягових двигунів електрорухомого складу в режимах зрушення з місця, розгону до заданої швидкості та подальшої стабілізації цієї величини швидкості [173]. Врахуванню обмежень на величини повздовжніх динамічних сил у поїзді, яким (обмеженням) повинне відповідати регулювання швидкості тягового рухомого складу, присвячено роботи [27, 156, 174]. Цифрову реалізацію елементів системи автоматичного регулювання швидкості поїздів метрополітену розглянуто в роботах [164, 175].

Важливим фактором, який впливає на рух поїзда під тягою, є нестабільність напруги живильної мережі як у часі (з причини зміни в часі кількості тягових одиниць на даній тяговій ділянці), так і в просторі (з причини повздовжнього падіння напруги на проводах). При тяговому розрахунку, який є складовою частиною здійснення енергорационального автоведення поїзда [12], цей фактор враховують у вигляді напруги на струмоприймачі електротягової одиниці. Зазвичай враховують тільки детермінований процес зміни напруги [87, 173, 176], більш адекватний реальній ситуації випадок наявності як детермінованої, так і випадково змінної в часі (стохастичної) складової напруги на струмоприймачі, розглянутий у роботі [177].

Мінімізація інтервалу попутного прямування є дуже обмеженою за можливостями; обмежуючим фактором є вимоги безпеки руху. Нижня межа цього інтервалу жорстко закладена в алгоритмах функціонування систем АР всіх трьох розглянутих вище типів – графікової, інтервальної та графіково-інтервальної [12]. Все ж слід зазначити, що певний ресурс регулювання закладений і тут, як це свідчить

досвід роботи французьких систем Maggaly (метрополітен) [16] та Astrée (лінії швидкісних електропоїздів) [178]. Ці системи здійснюють інтервальне регулювання без використання фіксованих меж блок-ділянок, обчислюючи та реалізуючи (за необхідністю) мінімально безпечний інтервал на базі даних, що безперервно надходять до бортового комп'ютера, про власну швидкість поїзда, його місцезнаходження та про місцезнаходження інших поїздів на лінії; за цими даними та результатами обчислень здійснюється автоведення кожного з поїздів.

Отже, забезпечення кожного з перелічених критеріїв оптимальності роботи системи АРУ так чи інакше обов'язково включає в себе вибір комбінації режимів руху поїзда перегонном. Усталеною трійкою режимів, що знайшли своє використання на метрополітені та в тяговому рухомому складі приміського сполучення є тяга, наступний рух із вимкненими двигунами (рух по інерції – вибіг) і гальмування [2, 11, 12]. На довгих перегонах може бути використане повторне ввімкнення двигунів [12, 135] – додатковий режим тяги. Цей додатковий режим також було використано в системі КСАУП Ленінградського метрополітену для ліквідації затримки поїзда [179]. У дослідницькій роботі [180] цей перелік режимів розширено, у нього включено рух з максимальною тягою, рух з неповною тягою, пунктирну тягу, вибіг, підгальмовування, гальмування з максимальною інтенсивністю; вказівки на певні градації всередині усталених режимів містяться також у роботі [181]. Таким чином, просліджується можливість (або необхідність) переходу до плавного управління інтенсивністю режимів руху поїзда.

Для визначення результатів застосування вибраного режиму руху – пройденого шляху, досягнутої швидкості та прискорення – є необхідною вимірювальна складова системи АР. Зазвичай це певний комплекс апаратних засобів, встановлений на електротяговій одиниці. Його наявність і забезпечення ним високої точності вимірювання шляху та швидкості суттєво підвищують пропускну спроможність транспортної лінії: очікуваний ефект, виражений через величину міжпоїзного інтервалу, за прогнозами 1991 р., виглядав як зменшення цього інтервалу в 2,5...3 рази [182]. Відомими типовими методами вимірювання пройденого шляху тягового рухомого складу є [12]: тахометричний з перерахунком кількості поділок датчикового диска в пройдений шлях; кутовий, при якому пройдений шлях обчислюється через кут повороту колеса, що котиться (цей спосіб був випробуваний на Харківському метрополітені; похибка вимірювання на перегоні довжиною 2405 м лежала в межах (0,550 – 0,275) м); радіотехнічний по радарних даних [186].

Уточнення величини пройденого шляху, яка використовується в системі автоведення, досягають урахуванням поточних величин швидкості та прискорення [183,]. Прикладом серійного зразка вимірювача шляху та швидкості може служити відповідний прилад фірми Alcatel TAS [184].

Відомими типовими методами вимірювання швидкості тягового рухомого складу є [12]: за кутовою швидкістю колісної пари за допомогою осьових датчиків або датчиків, встановлених у редукторі привода колісної пари; вся апаратура, розташована на поїзді; за відрізкама точно відомої довжини, розташованими точно на колії з використанням шлейфів проводів, що схрещуються, рейкових кіл або точкових датчиків; апаратура, розташована частково на поїзді, а частково на колії; застосування радіотехнічних доплерівських або кореляційних вимірювачів швидкості [185, 186], або вимірювання швидкості за координатними даними, отриманими із штучних супутників Землі. Підвищення точності вимірювань досягають шляхом використання бортових інтелектуальних засобів обробки сигналів первинних датчиків [187, 188].

Останнім часом відчутну увагу досліджувачі та розробники приділяють методології використання сигналів супутникових систем глобальної навігації GPS та ГЛОНАСС для вимірювання параметрів руху поїздів при пересуванні останніх на відкритих ділянках колії. За даними роботи [81], доступна точність визначення місцезнаходження в 2007 р. складала 15 м, а похибка вимірювання швидкості таким методом складала менш ніж 0,5 %. Подальшого покращення точності вимірювань можна очікувати, якщо вони проводитимуться з використанням створених за супутниковими даними еталонних координатних моделей колії [189, 190].

Системи автоведення поїздів є складовою частиною засобів забезпечення безпеки руху, а отже, підлягають певній експертизі та сертифікації. У Випробувальному центрі підприємства ОАО «ВЭЛНИИ» в лабораторії випробувань програмних засобів та систем автоведення для бортового програмного забезпечення таких систем розроблено й атестовано Типову методику експертизи та сертифікаційних випробувань; поява такої методики є ознакою виходу систем АР на рівень широкого промислового виготовлення та застосування. Системи АР пройшли доволі довгий шлях розвитку, починаючи з приблизно середини 1950-х рр. (як приклад, радянський «Автомашиніст» зразка 1957 р. [12], прогресуючи перш за все на метрополітенах [11, 12, 15, 16, 20] і, можливо меншою мірою, на тяговому рухомому складі приміського та міжміського сполучення [2, 12, 13, 24, 45]. Особливо відмітно внесок, зроблений у 1970-80 рр. фахівцями Харківського метрополітену, в сумісне з розробниками удосконалення комплексних систем автоведення, створених ученими та фахівцями МІИТ, ВНИИЖТ і Московського метрополітену [1, 12]. Останнє десятиріччя характеризується майже повним переходом від використання систем АР одиночного виготовлення до типових систем, запропонованих на ринку транспортного будівництва низкою фірм та організацій, перш за все Siemens, Alstom, Thales, Національним товариством французьких залізниць [28, 141, 178, 192-196], Московським галузевим центром впровадження нової техніки та технологій [58]. Дані системи, як правило, встановлюються «під ключ» на метрополітенах, міських, приміських та (рідше) швидкісних міжміських залізницях, забезпечуючи їх ефективно, безпечно та енергооптимальне

функціонування.

1.3 Проблеми та перспективи розвитку сучасних систем автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом електропоїздів

Інвентарний парк електропоїздів приміського сполучення Укрзалізниці складає 1547 секцій електропоїздів, з них 1340 – в експлуатації [197], в тому числі 694 секцій змінного струму і 853 секцій електропоїздів постійного струму [198].

Основу парку електропоїздів постійного струму складають секції серій EP2 та EP2T 1960-80х років випуску. Окрім них значну частку парку займають електропоїзди серії EP1 1959-1962 рр. випуску, що експлуатуються лише на Придніпровській залізниці.

Парк електропоїздів змінного струму складають серії EP9M, EP9П, EP9T та EP9E 1960-80-х рр. випуску. У наявному парку найбільша кількість поїздів змінного струму припадає на поїзди серії EP9M, що експлуатуються.

Ці серії майже повністю вичерпали визначений ресурс експлуатації і потребують проведення капітальних ремонтів з продовженням терміну служби для забезпечення подальшої експлуатації або повної заміни. Зокрема поїзди серії EP1 працюють понад 50 років і планується їх поступове списання з інвентарного парку [198].

Протягом 1990-х рр. закупівля нового рухомого складу майже не велась. За роки незалежності було закуплено лише 50 потягів виробництва ВАТ ХК «Луганськ тепловоз» серій ЕПЛ2Т та ЕПЛ9Т різних модифікацій [199] і 8 потягів закордонного виробництва серій ЭД4 та ЭД9М. Дані потяги експлуатуються в межах нормативного терміну служби.

Для забезпечення пасажирських приміських перевезень з урахуванням подальшої електрифікації потреба в парку електропоїздів змінного струму у 2020 р. складе 918 секцій, постійного струму – 1062 секції [198].

Для забезпечення такої кількості секцій необхідно проводити закупівлю нових потягів, модернізацію з продовженням терміну служби для наявних та впровадження ефективних методів керування тяговим електроприводом.

Система АРУ МВРС є складовою системи АВП і повинна забезпечувати таку сукупність дій [2, 11-19]: пуск та розгін; ведення поїзда перегонем в оптимальному швидкісному режимі; виконання обмежень швидкості; прицільне гальмування біля платформ; відчинення та зачинення дверей вагонів; оборот поїзда на кінцевих станціях; вимірювання параметрів руху поїзда, накопичення та обробку цієї інформації. Дана сукупність дій та засоби її реалізації функціонально та фізично визначають систему АРУ як таку. У цілому з огляду робіт [100, 104] системи автоматичного регулювання (САР), що застосовуються в сучасній техніці, дуже різноманітні. Швидке розширення функціонального призначення автоматичних систем, що стало можливим завдяки впровадженню обчислювальної техніки, збільшує число реалізованих класів систем. У цих умовах дати завершену детальну класифікацію систем автоматичного регулювання практично не можливо. Класифікації, що з успіхом застосовувалися в недавньому минулому, стають у даний час занадто вузькими, не охоплюють нових розроблених та реалізованих систем.

Залежно від характеру зміни складових задає під «дії» автоматичні системи регулювання поділяють на чотири класи:

I клас. Стабілізуюча автоматична система, алгоритм функціонування якої містить припис підтримувати регульовану величину постійною при зміні зовнішніх умов. Прикладами таких систем можуть бути системи автоматичного регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля, обмеження максимального струму або напруги тягового генератора, напруги допоміжного генератора, підтримки швидкості руху тощо.

II клас. Програмна автоматична система, алгоритм функціонування якої містить припис змінювати регульовану величину за заздалегідь заданим законом (функцією). До таких систем можна віднести і системи, які виконують певну послідовність операцій при подачі необхідного сигналу. Прикладом такої системи може бути система запуску дизеля тепловоза або система розгону локомотива.

III клас. Автоматична система стеження, алгоритм функціонування якої містить припис змінювати регульовану величину залежно від значення змінної, закон зміни якої є невідомою функцією. Прикладом такої системи є сільсиновий привод, який використовується в системі управління електродинамічним гальмом тепловоза ТЕП70.

IV клас. Оптиміальна автоматична система, яка забезпечує оптимальне підтримання регульованої величини згідно з тим чи іншим критерієм.

Залежно від того, якою математичною моделлю описуються процеси в САР, вони поділяються на лінійні системи, математична модель яких складена з лінійних диференціальних рівнянь, та нелінійні системи, математична модель яких складена з нелінійних диференціальних рівнянь.

Залежно від характеру зміни керуючих сигналів у системах автоматичного регулювання вони поділяються на безперервні (аналогові) системи, дискретні (цифрові) системи, релейні (дискретно-безперервні) системи. Кожна з цих трьох систем поділяється на стаціонарні та нестаціонарні системи із

зосередженими або розподіленими параметрами.

За типом і кількістю сигналів системи автоматичного регулювання поділяються: на одноконтурні системи, у яких є одна регульована величина; багатоконтурні системи, у яких є декілька головних або місцевих зворотних зв'язків, системи незв'язаного регулювання, які призначені для регулювання різних величин, непов'язаних один з одним і взаємодіючих тільки через загальний об'єкт регулювання.

Залежно від наявності або відсутності помилки підтримки регульованої величини автоматичні системи поділяються на статичні й астатичні.

За кількістю контурів регулювання автоматичні системи поділяються на одноконтурні та багатоконтурні.

За наявності двох або більше регуляторів багатоконтурні автоматичні системи можуть бути непов'язаними або пов'язаними.

Замкнуті системи автоматичного регулювання розрізняються принципами регулювання: за відхиленням, компенсації збурення, комбіновані.

З точки зору наявності їх на рухомому складі у відповідності до [12, 67-71] вони являють собою трирівневу ієрархічну структуру, у яку входять такі підсистеми: I рівень – машиніст; II рівень – центральна система управління, система управління рухом ТРС, система контролю і діагностики, система управління допоміжним обладнанням; III рівень – система управління окремими енергетичними пристроями, система управління напругою ТЕД, система формування зворотних шляхів.

За типовими функціональними схемами системи АРУ ТРС у відповідності до [12, 67-71] можна підрозділити:

- на одноконтурні системи стабілізації струму і швидкості (вони належать до найбільш простих систем і працюють по замкнутому циклу, тобто з регулюванням по відхиленню, і використовуються на електровозах ЧС7, ЧС8, ЧС200 та електропоїздах ЕР200);
- системи програмного регулювання (система одноконтурна, регулювання здійснюється по одному показнику – струму ТЕД);
- багатоканальні системи автоматичного регулювання (забезпечує рівномірний розподіл струмів між ТЕД);
- багатоконтурні системи автоматичного регулювання (регулювання виконується по декількох контурах, а відповідно і декількох параметрах – струму ТЕД, швидкості ТРС і т.д.).

На ТРС, який експлуатується на колії 1520 мм, використовують такі види систем АРУ: швидкості з релейно-контактною системою управління; з тиристорними перетворювачами (електровоз ВЛ85); кута запалу інвертора (електровоз ВЛ80); багатоконтурна з двигунами незалежного збудження; адаптивні електропоїздів (ЕР2Р, ЕР12, ЕР29, ЕР30).

Система АРУ повинна в будь-якому разі забезпечити керування, що відповідає таким вимогам [87-89, 115, 130-132]:

- забезпечення при зрушенні з місця здійснення великого обертового моменту, те ж саме – при здійсненні прискорення;
- забезпечення стійкої роботи двигунів при перевантаженнях за механічним моментом навантаження ;
- дотримання параметрів руху поїзда, незважаючи на зміни напруги живильної тягової мережі, як плавні (через падіння напруги вздовж проводу), так і стрибкоподібні (при переході між ділянками мережі);
- використання режимів роботи двигуна, при яких у живильну мережу надходить мінімальна потужність гармонік, тобто забезпечення високої якості спожитої електроенергії;
- забезпечення як суто механічного гальмування, так і поєднання його з рекуперативним гальмуванням;
- парировання режимів боксування або юзу керованих колісних пар або навіть окремих коліс;
- дотримання заданої швидкості перевodu поїзда у визначений системою режим.

При всьому цьому двигуни, апаратне обладнання та (при наявності) програмне забезпечення повинні бути в сумі якомога більш дешевими.

Значний внесок у розроблення 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.И., 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., Сидельников В.М., Сінчук О.М., Тартаковський Е.Д., Хворост М.В., Феоктистов В.П. та інші.

Так, у роботах [200-204, 246], які виконувались під керівництвом Носкова В.І., Дмитренка В.Д., Заполовського Н.І., Леонова С.Ю., розглядаються системи керування дизель-поїздом з асинхронними

тяговими двигунами типу ДЕЛ-02. Вони розробили моделі дизель-поїзда з електроприводом змінного струму, як об'єкта управління.

Гусевський Ю.І. багато уваги приділив науковим основам створення ефективних систем тягового електроприводу з тиристорними перетворювачами для автономних локомотивів [205-210]. Він розробив і теоретично обґрунтував спосіб синтезу інваріантних систем фазоімпульсного керування (СІФК) випрямлячами, що керуються (КВ), при напрузі і частоті джерела живлення, що змінюються, і пов'язано з регулюванням частоти обертання тягового синхронного генератора (СГ). Також ним виконано теоретичне обґрунтування доцільності застосування на перспективних автономних локомотивах систем ТЕП з двофазними блоками АІН-АД.

У роботах під керівництвом Панасюк А.М., Шмакова А.С., Політило Е.Д. [211, 212], розглянуто питання оптимального частотного управління асинхронним приводом з урахуванням електромагнітних процесів.

Кулагін Д.О. вперше синтезував регулятор частоти для системи керування автономним інвертором напруги, побудованої на основі подвійного регулятора струму, який ураховує наявні пружні зв'язки між елементами тягової електропередачі змінного струму для дизель-поїзда [213-217].

Імпульсним системам керування і захисту багато уваги приділив Сінчук О.В. у своїх працях [218-221].

Професори ДНУЗТ ім. В.Лазаряна Босов А.А. і Гетьман І.К. сформулювали задачі визначення параметрів перспективних електровозів і оптимізації тягових розрахунків, як задачі векторної оптимізації [222-226].

Учені під керівництвом Боднаря Б.С. багато приділили уваги розрахункам ефективної організації роботи систем діагностування; методам оцінки впливу системи діагностування локомотивів на систему їхнього утримування; створенню систем автоматизованого контролю і діагностування локомотивів [227-229].

Також багато уваги приділив системам діагностики електричного обладнання рухомого складу російський учений Феоктистов В.П. [230-335].

Замкнуті системи АРУ на електровозах змінного струму з підтримкою швидкості руху поїзда і стабілізацією струмів ТЕД розглянуто в працях Жиркова А.І. і Пліса А.І. [125, 236].

Роботи луганських учених під керівництвом професора Басова Г.Г. та Міщенко К.П. по МВРС в основному направлені на вирішення завдань вибору раціональних параметрів рухомого складу [237-240].

Системам електричної тяги поїздів метрополітенів багато уваги приділено в працях доктора наук Хвороста М.В. [241, 242].

Під керівництвом Соріна Л.Н. (Росія, м. Москва, ООО «АВП Технологія») розроблено підходи до автоматизованого ведення приміських електропоїздів, вантажних та пасажирських електровозів будь-якого виду струму [243]. Багато уваги теорії електричної тяги приділено в працях Розенфельда В.Е. [87, 244].

У 1969 р. в Московському енергетичному інституті на кафедрі «Електричний транспорт» під керівництвом д.т.н., професора В.Е. Розенфельда було розроблено схему тиристорного частотно-імпульсного регулювання ТЕД. Застосовуючи цю схему, ПКБ локомотивного господарства МШС розробило проект обладнання електропоїзда ЭР2И, який у 1970 р. здійснив першу поїздку за маршрутом Москва – Александрів – Москва.

З метою зменшення габаритів електричної силової апаратури та підвищення ходових властивостей електропоїзда розроблено схему тиристорного широтно-імпульсного перетворювача для електропоїзда ЭР200 [245]. У схемі силового кола моторного вагона застосовані потужні швидкодіючі тиристори ТБ353-630-16. Слід зазначити, що в сучасних системах для подібних функцій доцільно використовувати IGBT-транзистори, наприклад FD800R33KF2, обраний з урахуванням потрібних електричних характеристик. Основною перевагою такого вибору є значно вищі показники надійності. Поряд з тим, заміна тиристорів на IGBT-транзистори дає змогу зменшити витрати електроенергії за рахунок зменшення падіння напруги на цьому елементі у відкритому стані. Так, згідно з електричними характеристиками цей параметр для тиристора ТБ353-630-16 складає 3,5 В, а для FD800R33KF2 – 2,5...2,9 В для діапазону робочих струмів ТЕД. Тобто при струмі 250 А потужність, яка розсіюється за рахунок нагріву елемента для ТБ353-630-16 – 875 Вт, для FD800R33KF2 – 625 Вт. З урахуванням функціонування елементів в імпульсному режимі виграш буде меншим.

Російські вчені провели дослідження надійності електровозів при експлуатації їх в умовах Транссибірської магістралі [246], а саме: проведено системний аналіз надійності гранично навантаженого устаткування електровоза: перетворювачів, реакторів, ТЕД і асинхронних допоміжних машин. У результаті дослідження встановлено, що найбільший вплив на пробої ізоляції ТЕД виявляє струмове навантаження (температура нагрівання ізоляції) та її характер (швидкість нагрівання ізоляції), а залежність відмов ізоляції ТЕД від величини струмового навантаження носить параболічний характер. У роботі [246] підтверджується, що закономірність по старінню ізоляції ТЕД, обумовлена не тільки перевищенням гранично припустимої температури для даного класу ізоляції, але й більшою мірою перевищенням гранично припустимої швидкості її нагрівання. При цьому найбільша кількість відмов викликана пробоем ізоляції обмоток і коловими вогнями на колекторно-щітковому вузлі. Однією із причин, що викликають коловий вогонь на колекторі, є затягування міді в міжламельні проміжки колектора. Виходячи з цього, автори стверджують про

необхідність уведення безперервного контролю й стабілізації температури основного устаткування електровозів та пропонують до впровадження систему безперервного контролю й стабілізації температури гранично навантаженого устаткування, що забезпечить мінімально можливе теплове зношування ізоляції обмоток та оптимальні умови роботи колекторно-щіткового вузла ТЕД. Результати впровадження системи безперервного контролю температури гранично навантаженого устаткування електровоза показали [246], що введення системи 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 в 2,6-3,3 рази; кількість колових вогнів на колекторах тягових двигунів в 3,1-3,7 рази; зношування колекторів тягових двигунів в 2,8-3,4 рази; зношування щіток тягових двигунів в 1,2-1,3 рази, а експлуатація електровозів без системи регулювання тепловими режимами устаткування збільшує кількість відмов в 1,5-3,5 рази. Як стверджують автори роботи, система безперервного контролю температури гранично навантаженого устаткування забезпечує високий рівень надійності як електровоза, так і всієї системи «Перегін залізниці». Однак уведення системи збільшує інформаційне навантаження на локомотивну бригаду й може знизити в цілому надійність глобальної системи «машиніст – електровоз – состав – колія – електропостачання – СЦБ і зв'язок – організація руху – середовище». Тому такі системи контролю необхідно включати безпосередньо в процес керування ТЕП рухомого складу. У той же час у працях цих учених не приділено відповідної уваги науковій проблемі формування ефективних параметрів керування ТЕП при додаткових обмеженнях характеристик перехідних динамічних процесів, обмеженнях на іскріння, зміні зовнішніх факторів, умов руху МВРС, параметрів теплового режиму ТЕД, а також урахування обмеження на боксування. Незважаючи на наявність багатьох досліджень у галузі розроблення й виробництва технічних засобів автоматичного регулювання та керування МВРС, наукова проблема визначення ефективних параметрів керування ТЕП при додаткових обмеженнях досі не вирішена. Це потребує впровадження удосконалених моделей і методів керування МВРС шляхом урахування особливостей об'єкта керування і нової форми подання законів управління, що дасть змогу підвищити показники енергоефективності та зменшити експлуатаційні витрати.

1.5 Висновки до розділу 1

Проведений аналіз сучасного стану та перспектив розвитку автоматизованих систем керування рухомим складом дає змогу зробити такі висновки:

1. На існуючих електропоїздах використовуються тягові електропередачі, які розроблені всередині минулого століття. Ефективність їх функціонування значною мірою залежить від раціонального використання МВРС та людських ресурсів, що потребує необхідної координації роботи всіх управлінських підрозділів. У той же час рівень покриття експлуатаційних витрат доходами від перевезень у приміському залізничному сполученні складає біля 15 %, тобто витрати перевищують сукупні доходи в 6,5 разів.

2. Автоматичне керування рухом електропоїздів покликане в найзагальнішому сенсі розв'язати проблему раціонального використання енергетичного та часового ресурсів залізниці. В той же час, існуючі системи керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу, які переважно розраховані на розв'язання цієї проблеми, недостатньо враховують обмеження, що накладаються на роботу власне тягових електродвигунів.

4. На даний час склалася стабільна концепція керування рухом рейкового транспорту на полігоні. Технічні засоби, які реалізують цю концепцію і відповідно до неї формують та подають до рухомого складу керуючі діяння, що визначають режим руху, досить широко напрацьовані. Однак щонайменше у вітчизняних реаліях ці діяння мають переважно директивний характер, залишаючи відкритою проблему спроможності їх реалізації конкретною моторвагонною одиницею відповідно до технічного стану вузлів її тягового електроприводу.

5. Задача оптимізації керування тяговим електроприводом принципово є задачею багатокритеріальною, причому чинники, які визначають внесок кожного з критеріїв, можуть під час руху змінюватися. Це вимагає неперервної адаптації системи керування до поточної ситуації (її «навчання»).

6. Незважаючи на наявність багатьох досліджень у галузі розроблення й виробництва технічних засобів автоматичного регулювання та управління МВРС, наукова проблема розробки нових методів та моделей прогнозування ефективних параметрів керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу при додаткових обмеженнях характеристик перехідних динамічних процесів, обмеженнях на іскріння, зміні зовнішніх факторів, умов руху МВРС та параметрів теплового режиму ТЕД досі не вирішена. Це дає змогу представлену дисертаційну роботу, що направлена на вирішення цієї проблеми, вважати актуальною.

РОЗДІЛ 2

Визначення ефективних законів керування процесами руху електропоїздів

2.1 Лінеаризація математичної моделі тягового привода електропоїзда на основі засобів геометричної теорії керування

Геометрична теорія керування [75, 190, 247] припускає спочатку перехід за допомогою засобів диференціальної геометрії в новий простір, де математична модель об'єкта керування залишається еквівалентною вихідній моделі, але стає лінійною. Потім проводиться синтез регулятора або законів керування для об'єкта, який описується системою лінійних звичайних диференціальних рівнянь, а потім виконується зворотний перехід у вихідний простір, де об'єкт описується системою нелінійних диференціальних рівнянь.

Математична модель електропривода постійного струму може бути зведена до виду, зручного для розв'язання задач автоматичного регулювання та керування:

$$\begin{aligned} & \dot{I}_A = -\frac{R_A}{L_A} I_A + \frac{U_{\text{П}}}{L_A} - \frac{E}{L_A}; \\ & \dot{I}_B = -\frac{R_B}{L_B} I_B + \frac{U_{\text{П}}}{L_B} - \frac{E}{L_B}; \\ & \dot{\omega} = \frac{1}{J} (M - M_{\text{в}}); \\ & \dot{S} = -g - \frac{v}{R_{\text{в}}} \end{aligned} \quad (2.1)$$

де i_A, i_B – відповідно струм якірної обмотки й струм обмотки збудження;

L_A, L_B – відповідно індуктивності якірної обмотки й обмотки збудження;

$U_{\text{П}}$ – напруга живлення еквівалентного двигуна;

$R_A, R_{\text{Ш}}, R_D, R_B$ – відповідно активні опори якірного ланцюга, шунта, додаткового резистора й обмотки збудження;

$C_E, C_{\text{Ш}}, C_M, k_2, a_0, a_1, a_2$ – постійні коефіцієнти;

W – число витків обмотки збудження;

n – обороти електродвигуна;

$\omega_{\text{ан}}$ – аналітичний опис кривої намагнічування;

η – передатне відношення редуктора електродвигуна;

m – маса електропоїзда;

R_K – радіус колеса колісної пари;

k_1 – число двигунів електропоїзда;

j – коефіцієнт, що враховує ухил залізничної колії, у загальному випадку залежить від ділянки колії;

g – прискорення вільного падіння.

Запишемо систему рівнянь (2.1) привода електропоїзда в режимі розгону в більш зручній формі:

(2.2)

де x_1, x_2, \dots, x_n ;

EMBED

Equation.3

Необхідною й достатньою умовою лінеаризації зворотним зв'язком за станом [251-255] у деякому околі початку координат математичної моделі нелінійного об'єкта керування, описуваного системою з n звичайних диференціальних рівнянь, є наявність у матриці керуваності рангу n ($\det G$ може перетворюватися в нуль на початку координат) й інволютивної множини, складеної з перших $(n - 1)$ стовпців матриці G . Тут X, Y – векторні поля, пов'язані з лінеаризованою системою диференціальних рівнянь; LXY – похідна Лі векторного поля Y уздовж векторного поля X ; – похідні Лі $(n - 2)$ -го й $(n - 1)$ -го порядків поля Y уздовж векторного поля X [251-255].

Визначення 2.1 [251-255] похідної Лі скалярної гладкої функції векторного аргументу (x) по гладкій векторній функції $g = g(x)$ називається скалярна функція, що визначається співвідношенням:

де ;

;

Похідні Лі другого й більш високих порядків визначаються рекурсивно:

Похідна Лі нульового порядку скалярної функції f є сама ця функція [252-255].

Похідна Лі від векторної функції F EMBED Equation.3

ПО

векторній функції F вводиться аналогічно похідній Лі від скалярної функції векторного аргументу [252-255]:

EMBED Equation.3

Визначення 2.2. Дужки Лі функцій f, g

визначаються співвідношенням

Дужки Лі другого й більш високих порядків визначаються рекурсивно:

чи дужки нульового порядку $\{f, g\}$ рівні функції $f \cdot g$.

Визначення 2.3 [251-255]. Множина M лінійно незалежних векторних функцій EMBED Equation.3 EMBED Equation.3 EMBED Equation.3 називається інволютивною, якщо дужки Лі будь-яких двох функцій EMBED Equation.3 , EMBED Equation.3

із цієї множини M дорівнюють нулю або лінійній комбінації функцій із цієї множини.

Із системою диференціальних рівнянь (2.2) пов'язані векторні поля:

$$; \quad (2.3)$$

$$, \quad (2.4)$$

де

З умови лінеаризації нелінійного об'єкта керування випливає, що для лінеаризації системи рівнянь (2.2) зворотним зв'язком у просторі "вхід-стан" необхідно, щоб дужки Лі від двох перших стовпців матриці

керованості D дорівнювали нулю при ранзі матриці керованості, рівному трьом [251-255].

Обчислимо першу похідну Лі

Знаючи першу похідну Лі, можна обчислити дужки Лі L_1 й ранг матриці D

Безпосередня перевірка показує, що дужки Лі L_1 не дорівнюють нулю, а ранг матриці D рівний трьом. Звідси випливає, що умови лінеаризації зворотним зв'язком системи керування (2.2) у

просторі "вхід-стан" не виконуються. Тому в канал керування необхідно вводити додаткову змінну u , а в систему рівнянь (2.2) – додаткове диференціальне рівняння [251-255]:

(2.5)

де – нове керування.

З розширеною системою диференціальних рівнянь (2.5) пов'язані векторні поля

де

Для успішної лінеаризації системи диференціальних рівнянь (2.5) необхідно, щоб ранг матриці

був рівний трьом при будь-яких

. Безпосереднє обчислення похідних і дужок L_i показує, що

й ранг матриці $D1$ рівний чотирьом, тобто умови лінеаризації системи нелінійних диференціальних рівнянь (2.5) не виконуються. Уведення однієї, двох або будь-якого числа нових змінних (диференціальних рівнянь) у систему рівнянь (2.5) не дає змогу лінеаризувати зворотним зв'язком систему рівнянь (2.5) у просторі "вхід-стан". Багато в чому це пов'язано з тим, що в праві частини рівнянь (2.5)

входять одночлени з i , що описують криву намагнічування матеріалу двигуна. Ураховуючи, що в процесі розгону тягового рухомого складу двигуни постійного струму основний час працюють у режимі насичення магнітного потоку, то криву намагнічування можна наблизити двома відрізками прямих: AB і BC (рисунок 2.1), а при розв'язанні задачі оптимізації режиму розгону тягового рухомого складу використовувати тільки відрізок BC . Порівняння перехідних процесів при різних інтенсивних режимах розгону тягового рухомого складу при використанні експонентного наближення кривої намагнічування й відрізка BC , що наближає криву намагнічування в режимі насичення магнітного потоку, показало їхню несуттєву відмінність.

Рисунок 2.1 – Наближення кривої намагнічування електродвигуна постійного струму

При спрощеному описі кривої намагнічування математична модель (2.1) (або (2.2)) може бути записана у вигляді:

(2.6)

де a_1, a_2, a_3, a_4 – постійні коефіцієнти;

Із системою диференціальних рівнянь (2.6) пов'язані векторні поля:

Для лінеаризації системи рівнянь (2.6) необхідно, щоб дужки Лі від двох перших стовпців матриці керованості дорівнювали нулю при ранзі матриці керованості, рівному трьом [251-255]. Маємо:

де

Безпосередня перевірка рангу матриці керованості показує, що він рівний трьом, а дужки Лі

рівні нулю, оскільки перші два стовпці матриці є постійними. Таким чином, виконуються необхідні й достатні умови для перетворення системи рівнянь (2.6) до лінійного виду у формі Бруновського [251-255]:

$$\begin{aligned} & ; \\ & ; \end{aligned} \tag{2.7}$$

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

У цьому випадку існують функції , за допомогою яких здійснюється перехід від змінних до змінних :

$$\tag{2.8}$$

Підставляючи вирази (2.8) у систему рівнянь (2.7), одержимо

$$\text{EMBED Equation.3} ;$$

$$\text{EMBED Equation.3} ;$$

$$\text{EMBED Equation.3} .$$

За теоремою про лінеаризацію зворотним зв'язком за станом для функції Т1 повинні виконуватися співвідношення [251-255]:

$$; \tag{2.9}$$

$$; \tag{2.10}$$

$$, \tag{2.11}$$

де – дужки Лі нульового порядку, рівні самій функції .

Зі співвідношень (2.9), (2.10) з урахуванням значень стовпців матриці керованості G маємо:

$$; \quad (2.12)$$

$$. \quad (2.13)$$

З виразу (2.12) випливає, що функція $T1$ не залежить від змінної $x1$, тому рівняння в частинних похідних (2.13) можна записати у вигляді

$$. \quad (2.14)$$

Одним з можливих розв'язань рівняння (2.14) є таке:

$$. \quad (2.15)$$

Перевіримо можливість використання цього розв'язання. Спочатку переконаємося, що виконується нерівність (2.11) при розв'язанні (2.15):

Таким чином, нерівність (2.11) виконується.
Знаючи $T1$, нескладно визначити функції $T2(x)$ і $T3(x)$:

;

EMBED Equation.3

Для визначення взаємозв'язку між керуваннями у вихідній системі рівнянь (2.6) і в системі рівнянь у формі Бруновського (2.7) скористаємося останнім рівнянням із системи (2.7)

Оскільки $z_3 = T_3$, то маємо:

(2.16)

З визначення чи похідних маємо:

(2.17)

(2.18)

Підставляючи (2.17), (2.18) в (2.16), одержуємо

(2.19)

тобто взаємозв'язок між керуваннями в різних моделях визначений.

Отриману систему рівнянь (2.7) використовуємо для визначення ефективних законів керування електропоїздом при розв'язанні трьох різних задач автоматичного регулювання та управління рухом. При цьому будемо використовувати методику розв'язання задач, описану в роботі [203].

2.2 Синтез ефективних керувань тяговим приводом електропоїздів за допомогою системи керування у формі Бруновського й принципу максимуму Понтрягіна

Оптимізація процесів перевезення пасажирів є одним із важливих завдань залізничного транспорту приміського сполучення. Залежно від специфічних особливостей, що висуваються до перевезення пасажирів, руху електропоїздів, стану колії й положення інших складів можуть бути сформульовані різні задачі автоматичного регулювання та управління електроприводом тягового рухомого складу. Незважаючи на велику кількість таких задач, більшість із них може бути зведена до розв'язання задач керування при мінімізації або максимізації деякого функціонала. Найчастіше в теорії керування розв'язується задача мінімізації часу переведення об'єкта з однієї точки фазового простору в іншу або, інакше кажучи, задача максимальної швидкодії. Це завдання важливе й при керуванні розгоном МРС, особливо в тих випадках, коли графік руху складів досить напружений.

Розв'язання задачі максимальної швидкодії. Оскільки у формі Бруновського математична модель об'єкта керування містить усього три лінійні диференціальні рівняння, то задачу максимальної швидкодії можна розв'язати за допомогою принципу максимуму Понтрягіна.

Сформулюємо спочатку задачу максимальної швидкодії як задачу досягнення максимальної швидкості за мінімальний час при керуванні додатковим опором РД. У вихідній системі рівнянь (2.1) обороти еквівалентного електродвигуна, а, отже, і швидкість руху електропоїзда визначаються в результаті інтегрування третього диференціального рівняння. У системі рівнянь у формі Бруновського (2.7) змінної, яка прямо відповідає швидкості руху електропоїзда, немає. Однак змінна z_1 визначається співвідношенням (2.15):

$$\dots, \quad (2.20)$$

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

;

де – передатне відношення редуктора електродвигуна;

RK – радіус колеса колісної пари;

b_{31}, b_{21} – постійні коефіцієнти;

x_2 – струм збудження.

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

З виду системи диференціальних рівнянь (2.7) 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 РД) залежить від струму якоря, тому в кожний момент процесу розгону величина керування (величина опору РД) визначається співвідношенням:

або

,

де – максимально можливе керування при заданому значенні струму якоря;

– мінімально можливе значення опору при заданому значенні струму якоря.

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

2.3 Визначення ефективних законів керування в процесі розгону електропоїзда при додаткових обмеженнях

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

$$, \quad (2.21)$$

де S – відстань, яку проходить рухомий склад за час розгону від початкового пункту руху;

V – швидкість руху поїзда, , ;

q – постійний коефіцієнт;

l_{\max} – максимальна відстань, яку повинен пройти поїзд за інтервал часу розгону $[t_0, t_1]$.

Обмеження (2.21) запишемо в диференціальній формі з метою введення обмеження в систему диференціальних рівнянь, що описують об'єкт керування

$$, \quad ; \quad . \quad (2.22)$$

Після введення змінних:

;

,

із системи рівнянь (2.7) і рівняння (2.22) одержимо нову модель тягового рухомого складу у формі Бруновського:

$$(2.23)$$

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

,

де b – ваговий коефіцієнт.

У цьому випадку основні співвідношення принципу максимуму для об'єкта керування (2.23) такі:

;

;

де G – область допустимих керувань, що задається інтервалом ;

, – значення фазових координат у початковий момент часу;

, – значення спряжених змінних у кінцевий момент інтервалу керування.

Якщо керування v_1 не набуває своїх граничних значень i і $й$ знаходиться всередині інтервалу керування, тобто i $й$, тоді слушні вирази:

$$; \quad (2.24)$$

З теорії принципу максимуму [254, 255, 260] відомо, що для нормальних варіаційних задач, до яких належить і розв'язувана задача, спряжені змінні визначаються з точністю до довільного постійного

множника $й$ звичайно приймають, що . Крім того, для аналізованої задачі слушне співвідношення:

$$. \quad (2.25)$$

Двох інтегралів Φ і H рівнянь руху не достатньо для виключення всіх спряжених змінних, однак з їх допомогою $й$ за допомогою дужок Пуассона можна одержати третій інтеграл руху [254, 260]:

$$. \quad (2.26)$$

Підставляючи H і Φ у (2.26), після нескладних обчислень одержимо

$$. \quad (2.27)$$

Вектор спряжених змінних $, , \dots,$ у розглянутій задачі визначається також з диференціальних рівнянь

$$, \quad , \quad (2.28)$$

якщо відомі значення спряжених змінних у кінцевий момент часу t_1 . Диференціюючи праві частини рівнянь (2.28) з урахуванням виразу для функції H і умови, що $\dot{q}_i = 0$, одержимо:

$$(2.29)$$

Із системи рівнянь (2.29) нескладно знайти вектор спряжених змінних

$$(2.30)$$

із співвідношень (2.30) і (2.27) нескладно знайти константи C_1, C_2, C_3 і спряжені змінні

$$; \quad .$$

Це дає змогу з інтегралів рівнянь руху одержати систему алгебраїчних рівнянь

$$(2.31)$$

Оскільки можна прийняти, що $\dot{q}_i = 0$, то розв'язавши систему рівнянь (2.31), одержимо

При $v_1 < v_{1max}$ маємо

$$v_1 = v_{1max} \quad \text{або} \quad v_1 = v_1^* \quad (2.32)$$

При $v_1 > v_{1max}$ маємо

$$v_1 = v_{1max} \quad \text{або} \quad v_1 = v_1^* \quad (2.33)$$

Оскільки при невеликих значеннях b керування v_1 може перевищувати v_{1max} , то співвідношення (2.32), (2.33) необхідно уточнити:

де

Задаючи функції конкретні значення, із системи рівнянь (2.31) можна одержати й інші закони керування.

З нерівності випливає, що в цьому випадку розв'язання розглянутої задачі не відрізняється від розв'язання задачі максимальної швидкодії. Для того, щоб така відмінність спостерігалася, необхідне виконання умови

2.4 Вирішення завдання розгону електропоїзда при обмеженнях на витрату керування й перехідні динамічні процеси

Система рівнянь у формі Бруновського в цьому завданні має вигляд:

$$\dot{v}_1 = -\frac{1}{\tau} v_1 + u; \quad \dot{u} = -\frac{1}{T} u + v_1$$

Потрібно визначити керування v , на яке накладено обмеження $v_1 \leq v_{1max}$, що мінімізує функціонал

$$J = \int_0^T v_1 dt, \quad (2.34)$$

де b_0, b_1, z_3 – константи, при розгоні тягового рухомого складу з початкового стану z_0 , z_1 у кінцевий стан, у якому z_2 , а на змінні z_2 і z_3 обмеження не задані.

Основні співвідношення принципу максимуму для об'єкта керування (2.7) і функціонала (2.34) мають вигляд [254, 255, 260]:

$$(2.35)$$

$$(2.36)$$

$$(2.37)$$

$$(2.38)$$

де G – область допустимих керувань, що задається інтервалом $z_0 \leq z \leq z_1$;

z_0, z_1 – значення фазових координат у початковий момент часу;

z_2, z_3 – значення спряжених змінних у кінцевий момент інтервалу керування.

Якщо керування v не набуває своїх граничних значень v_0 і v_1 і міститься всередині інтервалу керування $v_0 < v < v_1$, тоді слушні вирази:

$$;$$

З теорії принципу максимуму [254, 255, 260] відомо, що для нормальних варіаційних завдань, до яких належить і розв'язване завдання, спряжені змінні визначаються з точністю до довільного постійного множника й звичайно приймають, що $\lambda_0 = 1$. Крім того, для розглянутого завдання слушне співвідношення:

$$(2.39)$$

За допомогою двох інтегралів Φ і H рівнянь руху одержимо третій інтеграл руху [254, 255]:

$$\dots \quad (2.40)$$

Тому що функція Φ не залежить від \dots і залежить тільки від \dots , то в сумі (2.40) тільки один доданок із шести не дорівнює нулю:

Оскільки з виразу (2.40) дужки Пуассона дорівнюють нулю, то маємо

$$\dots \quad (2.41)$$

Спряжені змінні можуть бути отримані й іншим способом – з рівнянь (2.38):

$$i \quad ; \quad (2.42)$$

$$i \quad ; \quad (2.43)$$

$$\dots \quad (2.44)$$

Зі співвідношень (2.41) і (2.43) випливає, що

Прирівнюючи вільні члени й члени, що залежать від часу, одержимо

$$;$$

Оскільки C_1 – константа, то це можливо тільки при \dots , тому маємо

Знаючи \dots з (2.35) і (2.39), можна визначити керування v :

або

Звідси одержуємо

(2.45)

Оскільки значення підкореневого виразу в (2.45) може перевищувати , то співвідношення (2.45) необхідно уточнити:

де

Якщо у всьому інтервалі керування, то розв'язання розглянутого завдання не відрізняється від завдання максимальної швидкодії.

При b_0 , тобто у цьому випадку закон керування збігається із законом керування при розв'язанні завдання максимальної швидкодії при обмеженнях на витрату керування.

2.5 Висновки до розділу 2

1 Теоретично встановлена можливість визначення ефективних законів керування процесами руху електропоїздів на основі геометричної теорії керування, що дало змогу розробити лінійну модель ТЕП із двигунами постійного струму, яка еквівалентна нелінійній моделі привода. Показано, що з її допомогою можна розв'язувати завдання автоматичного регулювання та управління рухом електропоїздів.

2 Лінеаризація математичної моделі ТЕП, що здійснена за допомогою засобів диференціальної геометрії, дала можливість здійснити перехід у новий фазовий простір, де математична модель об'єкта керування залишається еквівалентною вихідній моделі, але стає лінійною. Це дало змогу сформулювати необхідні завдання автоматичного регулювання та управління електроприводом електропоїзда.

3 Проведений синтез ефективних керувань електропоїздів за допомогою системи керування у формі Бруновського й принципу максимуму Понтрягіна дав змогу розв'язати завдання максимальної швидкодії, а саме мінімізувати час переведення об'єкта керування з однієї точки фазового простору в іншу, що важливо при керуванні розгоном електропоїздів, особливо в тих випадках, коли графік руху складів досить напружений.

4 Визначення ефективних законів керування в процесі розгону електропоїзда при додаткових обмеженнях дало змогу розв'язати завдання розгону електропоїздів при обмеженнях на витрату керування й перехідні динамічні процеси.

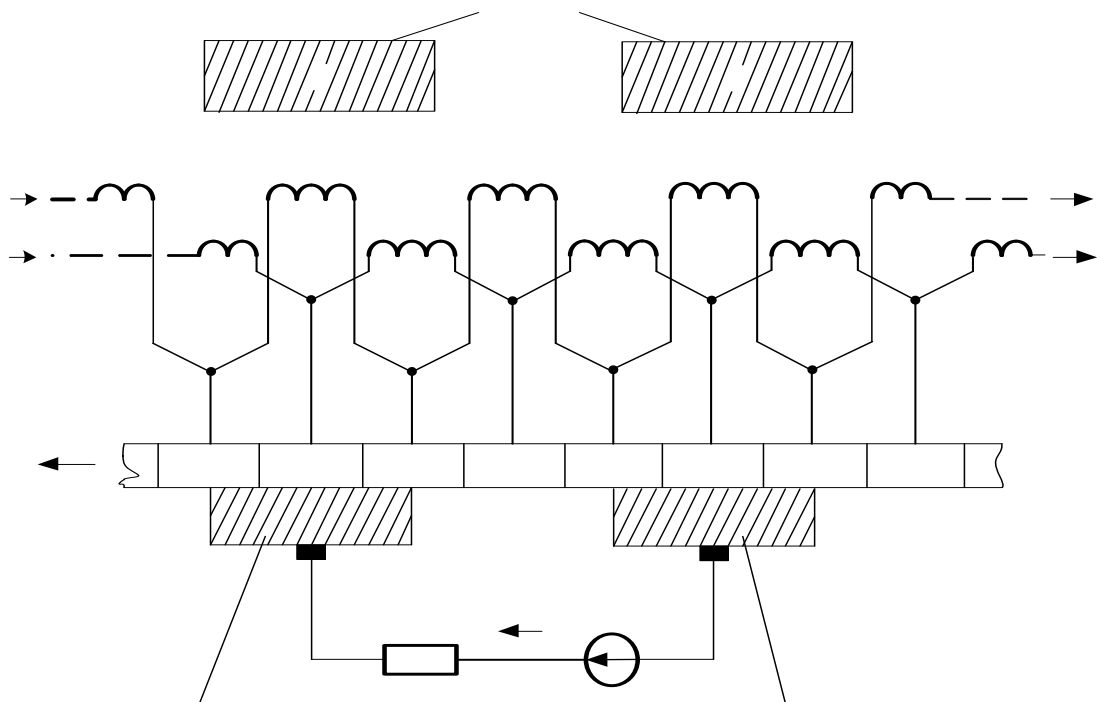
Розділ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМУТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ І ЧАСОВОЇ СТРУКТУРИ СТРУМУ ЖИВЛЕННЯ ТЯГОВОГО ДВИГУНА

3.1 Формування математичної моделі іскрового струму тягового двигуна

Фундаментальні наукові праці в галузі теорії комутації електродвигунів постійного струму присвячені виключно дослідженню електричних явищ безпосередньо у секціях обмотки якоря та пов'язаних з ними явищ на поверхні колектора (див., наприклад, монографії [263-266]), при цьому один з найважливіших експлуатаційних показників – ступінь іскріння – оцінюється або шляхом безпосереднього спостереження, або шляхом фіксації вторинних електромагнітних явищ навколо певним мінімальним чином препарованого двигуна [264-268]. На базі останнього способу мали місце спроби одержання діагностичної інформації щодо стану якоря двигуна шляхом інтерпретації тонкої структури струмів секцій якоря [267-270]. У той же час взаємопов'язаність електромагнітних процесів у двигуні 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 в основі вказаних явищ лежать змінні в часі контактні опори щіток та пластин колектора, які, строго кажучи, мають імовірнісний характер, обумовлений випадковістю кількості точок мікроконтакту [216]. Однак у макромасштабі опори контактів досить точно визначаються відомими детермінованими співвідношеннями для перехідних опорів [273, 280]. Тому вважатимемо ці опори саме детермінованими, бо таке припущення не впливатиме на загальний висновок.

Для зручності інтерпретації отриманих результатів максимально спростимо двигун, що розглядатиметься, із збереженням типових рис тягового електродвигуна, а саме: більшого від одиниці коефіцієнта щіткового перекриття та обумовленої ним наявності частини секцій, які не комутуються при пересуванні колектора на одну колекторну поділку. Непринциповими спрощеннями є обмеження кількості колекторних пластин вісьмома, наявність лише однієї пари полюсів та їх незалежне живлення. Площина розгортки такого двигуна наведена на рисунку 3.1, а схема його заміщення – на рисунку 3.2.



1, 2, ..., 8 – номери секцій;

– внутрішній опір джерела живлення;

Рисунок 3.1 – Площина розгортки досліджуваного двигуна

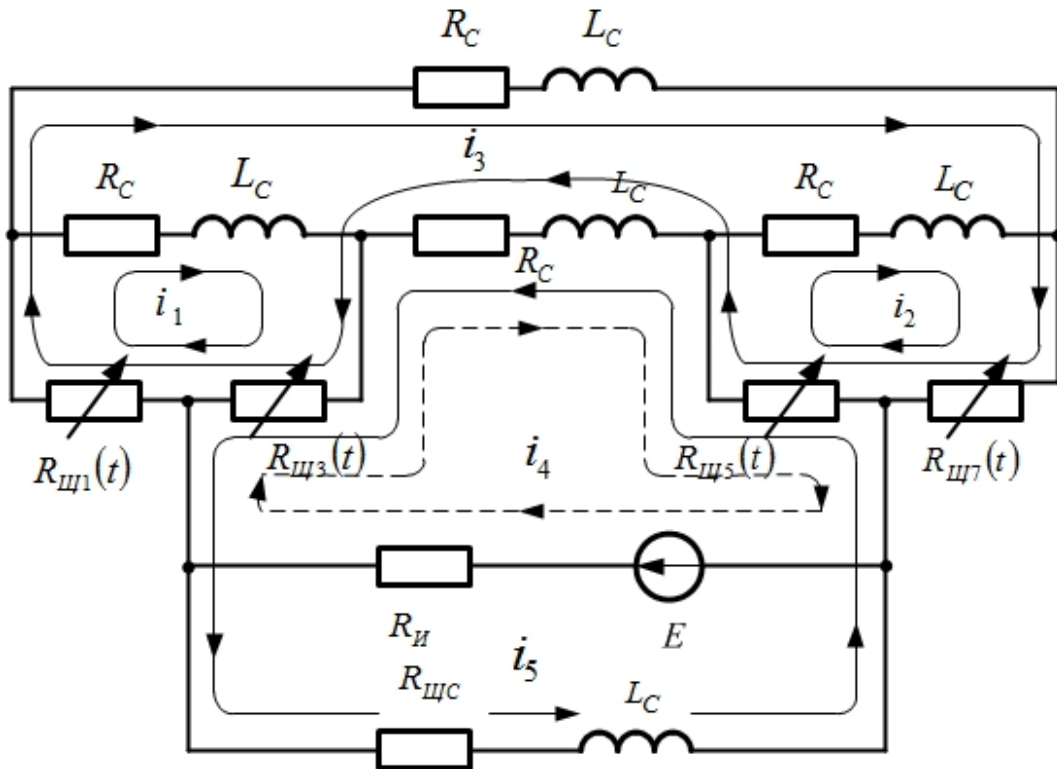


Рисунок 3.2 – Схема заміщення досліджуваного двигуна

Ця схема є справедливою для проміжку часу, протягом якого комутуються секції 2 та 6 і збігаючий край щітки Щ1 пересувається в межах пластини 1 колектора, а збігаючий край щітки Щ2 пересувається в межах

пластини 5 колектора і коефіцієнт щіткового перекриття α . Опір $R_{Щ1}(t)$ є перехідним опором

між збігаючою частиною щітки 1 та пластиною 1 колектора, опір $R_{Щ3}(t)$ є перехідним опором між набігаючою частиною щітки 1 та пластиною 3 колектора; аналогічний сенс для щітки 2 та відповідних

пластин мають опори $R_{Щ5}(t)$ і $R_{Щ7}(t)$. Припустивши ідентичність обох щіток та ідентичність усіх

пластин колектора, матимемо $R_{Щ1}(t) = R_{Щ3}(t) = R_{Щ5}(t) = R_{Щ7}(t) = R_{ЩС}$. Активні опори $R_{ЩС}$ та індуктивності

секцій вважатимемо однаковими для всіх секцій. Як $R_{И}$ позначимо постійну величину контактного опору між щіткою та цілком перекритою нею пластиною колектора (це пластини 2 та 6). Опір

$R_{И}$ є активним опором, який має місце для тієї частини струму джерела, яка відгалужується в секціях 1, 3, 5 та 7.

У складному колі, схему якого наведено на рисунку 3.2, нас цікавить струм i_5 джерела. Найдоцільнішим методом знаходження виразу для цього струму є метод контурних струмів [280]: при цьому кількість рівнянь мінімальна і дорівнює кількості незалежних контурів досліджуваного кола, а саме – п'ятьом;

шуканий струм i_5 збігається з контурним струмом i_5 . Увівши позначення

$R_{ЩС} = R_{Щ}$, отримаємо таку систему рівнянь, складених за другим законом Кірхгофа відповідно для контурів 1, 2, ..., 5:

$$R_{Щ} i_1 + L_C \frac{di_1}{dt} - R_{Щ} i_3 = 0; \quad (3.1)$$

$$; \quad (3.2)$$

$$; \quad (3.3)$$

$$\text{EMBED Equation.3} \quad ; \quad (3.4)$$

EMBED Equation.3

$$. \quad (3.5)$$

На початковому етапі розв'язання цієї системи диференціальних рівнянь зменшимо кількість невідомих, виразивши одні струми через інші. Спочатку додамо рівняння (3.4) та (3.5) і приведемо подібні члени. Отримаємо, що

$$, \quad (3.6)$$

звідки

$$. \quad (3.7)$$

Підставивши (3.7) в (3.5) і врахувавши, що рівняння

і звівши подібні члени, отримаємо

–

$$\dots \quad (3.8)$$

Позбудемося тепер струму i_1 в рівняннях (3.1), (3.3) та (3.8). Для цього виразимо його з рівняння (3.2):

$$\dots \quad (3.9)$$

Підставивши цей вираз в рівняння (3.10), отримаємо, що

$$\dots \quad (3.10)$$

Це перше рівняння з системи трьох рівнянь з трьома невідомими (i_1 , i_2 , i_3), яку ми будемо для подальшого розв'язання. Тепер позбавимось від i_1 в рівнянні (3.1). Для цього знайдемо i_1 з (3.9):

$$\dots \quad (3.11)$$

Підставивши i_1 в рівняння (3.3), отримаємо після зведення подібних членів

$$+ \dots \cdot \quad (3.12)$$

Це друге рівняння з будованої системи трьох рівнянь з трьома невідомими (враховуючи, що виражений через рівністю (3.7)).

Тепер позбавимося від в рівнянні (3.8). Оскільки, згідно з (3.11), залежить як від функцій часу від

опорів та, то спочатку зробимо допоміжний розрахунок, обчисливши похідну, яка входить до виразу (3.8):

Як правильно [268, 219, 280], є справедливими такі співвідношення:

$$; ; ,$$

де – період комутації. Крім того, оскільки, то маємо. Тоді

Підставимо праву частину цього виразу у рівняння (3.8); також підставимо туди з (3.11). Матимемо, що

Врахувавши, що , і, як наслідок , матимемо

або

.3

.

При дуже малому опорі джерела живлення можна вважати, що

, при .

Тому останнє рівняння можна звести до такого вигляду:

(3.13)

Це третє рівняння з системи, яку ми складаємо. Врахуємо у попередніх двох рівняннях (3.10) та (3.12)

згадані вище співвідношення між , та , а також введемо, згідно з [269, 280], позначення

Замість рівняння (10) матимемо таке рівняння:

Враховавши в ньому в явному вигляді та як функції часу, отримаємо

Записавши через , згідно з (3.7), матимемо

Як вже згадувалося, має місце наближена рівність . З її урахуванням, за умови дуже

малого опору джерела матимемо, що , тому доданком можна знехтувати, і остаточний вигляд рівняння (3.10) буде таким:

(3.14)

Зроблені з аналогічних міркувань перетворення рівняння (3.12) призводять до такого кінцевого результату:

. (3.15)

Тепер система трьох рівнянь з трьома невідомими складається з виразів (3.

13), (3.14) та (3.15). Але в першому з них ще фігурує струм . Записавши його через згідно з виразом (3.7) та звівши подібні члени, отримаємо таке рівняння:

(3.16)

Отже, розв'язувана система рівнянь утворена рівняннями (3.14), (3.15) та (3.16). Її подальше розв'язання шляхом зведення до диференціального рівняння вищого порядку відносно якогось одного з трьох струмів,

що в ній фігурують, уявляється неможливим. Подальший шлях для отримання , та як функцій часу визначимо, спираючись на те, що в класичній теорії комутації [264] струм секції має вигляд степеневого ряду за аргументом часу. Це дає підставу застосувати для розв'язання нашої системи відомий з теорії диференціальних рівнянь метод побудови розв'язку у вигляді степеневих рядів [281, 282]. Згідно з ним слід подати у формі степеневих рядів за аргументом часу як шукані струми, так і залежні від часу коефіцієнти рівнянь нашої системи. Спочатку запишемо струми:

(3.17)

Використаємо ці подання в рівнянні (3.14):

(3.18)

Записавши як функцію часу у явному вигляді, отримаємо

(3.19)

Неважко показати, що

(3.20)

Оскільки, як відомо [222] .3 , то

(3.21)

Врахуємо також відоме співвідношення

На базі трьох останніх співвідношень перетворюємо рівняння (3.19) до такого вигляду:

(3.22)

Тепер використаємо подання (3.17) в рівнянні (3.15):

EMBED Equation.3

(3.23)

Враховавши співвідношення (3.20) і (3.21) та звівши подібні члени, отримуємо таке рівняння:

$$\dots \quad (3.24)$$

Нарешті, перетворимо до кінцевого вигляду рівняння (3.16). Підставивши до нього опори \dots ,
 \dots , та \dots як функції часу в явному вигляді, а також струми у вигляді рядів (3.17),
отримаємо:

$$\dots \quad (3.25)$$

Врахувавши співвідношення (3.20) і (3.21) та звівши подібні члени, отримаємо таке кінцеве рівняння:

(3.26)

Отже, система, яка складена з рівнянь (3.22), (3.24) та (3.26) за відомих параметрів двигуна, є системою трьох рівнянь відносно трьох сукупностей невідомих коефіцієнтів a_0, a_1, a_2 , розвинення (3.17) струмів i_a, i_b, i_c у часові ряди. Струм i_a , в якого нас цікавить часова структура, однозначно визначений через i_b, i_c виразом (3.7). Тому спочатку розглянемо часову структуру струму i_a . Для цього спершу прирівняємо коефіцієнти при найнижчому степені часу (а саме при t^0) у лівій та правій частинах першого рівняння (3.22):

звідки випливає співвідношення

(3.27)

За своїм фізичним сенсом коефіцієнти α та β є постійними складовими контурних струмів i_2 та i_6 , які водночас є струмами комутованих секцій 2 та 6. Припустимо, що двигун є налаштованим на прямолінійну комутацію. Це означає, що постійні складові струмів комутованих секцій дорівнюють нулю, тобто за цих

умов $i_2 = i_6 = 0$. Крім того, припустивши, що індуктивність L секції є дуже малою, можемо

знехтувати доданком виразу (3.27), що містить $\frac{dL}{dt}$. В результаті за вказаних умов маємо, що

(3.28)

Для отримання подальшої інформації про часову структуру струму i_2 прирівняємо постійні члени лівої та правої частин рівняння (3.22)

Звівши подібні члени, отримаємо таку рівність:

За тих самих припущень, які були зроблені при інтерпретації виразу (3.27) та з урахуванням рівності (3.28), отримаємо, що

(3.29)

Оскільки за прямолінійної комутації коефіцієнти $k_{\text{ср}}$ та $k_{\text{ср}}^{\text{ср}}$ при першому степені часу є явно ненульовими, то $k_{\text{ср}}$, тобто $k_{\text{ср}}^{\text{ср}}$ містить складову, пропорційну часу. А тому в струмі $i_{\text{ср}}$, вираженому через $k_{\text{ср}}$ через співвідношення (3.7), теж є складова, що залежить від часу. Аналогічний висновок можна зробити, проаналізувавши співвідношення між коефіцієнтами лівої та правої частин рівняння (3.22) при більших степенях часу; рівняння (3.24) та (3.26) забезпечують можливість визначення конкретних величин цих коефіцієнтів через параметри двигуна та джерела живлення.

3.2 Визначення ступеня іскріння ТЕД шляхом оцінки параметрів часової структури живильного струму

Відомо, що часова структура живильного струму електродвигуна містить в собі компоненти, наявність яких викликана швидкоплинними процесами, що протікають в області контакту щіток та колектора [273, 267, 268]. Фізична природа іскріння на контактах і, зокрема, іскріння на колекторі розглянуті в низці фундаментальних та прикладних робіт [263-265, 267-270]. З огляду на особливу важливість, яку має контроль ступеня іскріння щіток для правильної експлуатації електродвигуна, набуває суттєвої важливості розгляд питання про інформативність живильного струму з точки зору отримання відомостей про іскріння двигуна. На цьому шляху слід розв'язати низку таких проміжних задач:

- 1) побудова адекватної розв'язуваної задачі схеми заміщення електродвигуна (на прикладі тягового електродвигуна РТ-117) з урахуванням джерел іскрового процесу;
- 2) побудова математичної моделі іскрового процесу;
- 3) розрахунок іскрової компоненти живильного струму;
- 4) розробка методів і засобів оцінювання ступеня іскріння електродвигуна за результатами оцінки параметрів цієї компоненти.

Розв'язання цих проміжних задач дозволить визначити ступінь іскріння електродвигунів постійного струму безпосередньо в ході експлуатації без їх препарування в ремонтних підрозділах.

Розглянемо тяговий електродвигун РТ-117, який має петльову обмотку якоря з кількістю паралельних віток n , кількістю головних полюсів $2p$ та кількістю пластин колектора $2p_1$ [261].

Колекторна поділка складає 4,3 мм, що за ширини щітки b мм дає коефіцієнт щіткового перекриття $k_{\text{ср}}$.

Побудована на базі цих даних розгортка двигуна наведено на рисунку 3.3, при цьому головні полюси зображені вище зображень секцій, а додаткові полюси не показані з огляду на їх непринциповість для розв'язання поставленої задачі. З цих же міркувань крок по пазах обмотки якоря показаний не в масштабі.

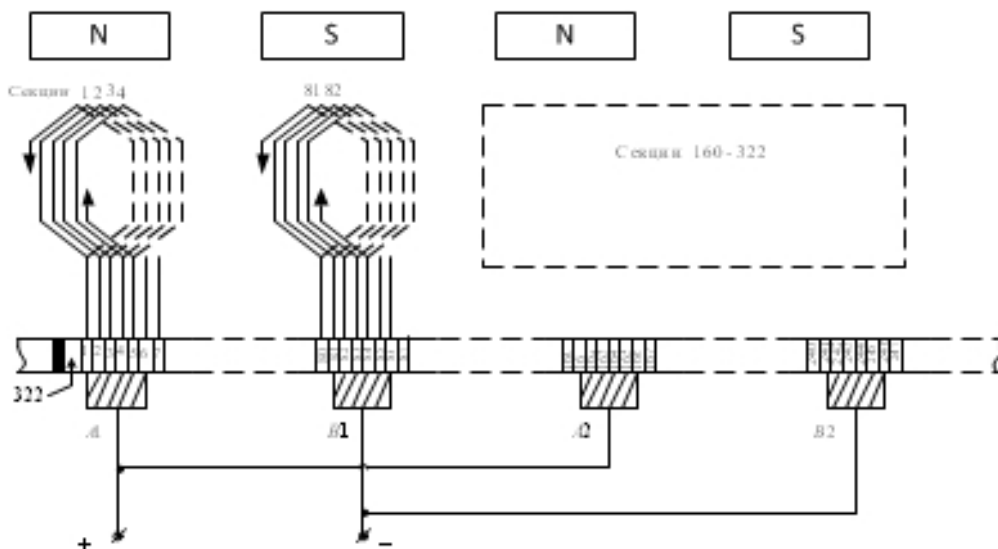


Рисунок 3.3 – Петльова обмотка якоря тягового електродвигуна РТ-117

Вирівнювачі (їх в РТ-117 міститься один на паз, причому в пазу 14 провідників) не зображені, їх наявність буде враховано нижче.

Позначимо через R_{12} величину перехідного опору між щіткою та однією цілою пластиною колектора, при цьому вважатимемо, що для всіх пластин та щіток величина R_{12} є однією і тією самою. Позначимо перехідний опір між збігаючим краєм щітки і відповідною пластиною колектора через R_{12} та аналогічний опір для набігаючого краю щітки через R_{12} . Для надання компактності схемі будемо позначати одну секцію як котушку індуктивності, вказуючи поруч з її умовним графічним позначенням символами L_{C1} та R_{C1} наявність в неї як індуктивності, так і активного опору. Вплив взаємної індуктивності між провідниками також відзначимо нижче.

З урахуванням вказаного схема заміщення фрагменту якоря, розташованого з першої по 160-ту пластину колектора, є такою, як показано на рисунку 3.4. При її побудові використане припущення, що всі точки тіла щітки є екіпотенціальними.

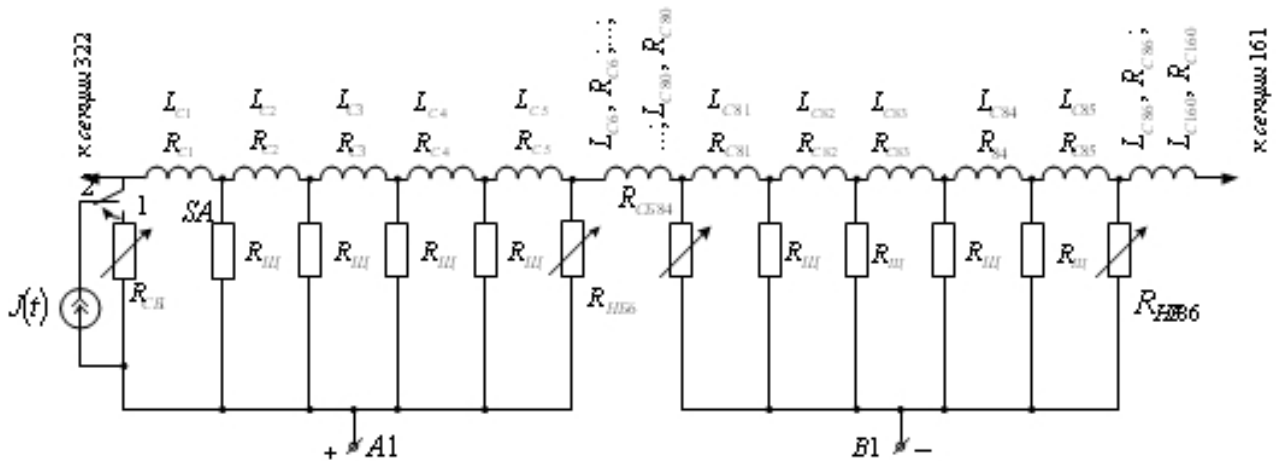


Рисунок 3.4 – Схема заміщення фрагменту якоря електродвигуна РТ-117

Для конкретності вважатимемо, що іскрить щітка А1, появі іскри відповідає перехід перемикача SA з положення 1 в положення 2. Струм іскри описаний ідеальним джерелом струму $J(f)$. Описання струму в іскровому проміжку саме джерелом струму обґрунтовано тим, що саме для іскрового струму є надійні результати його спостереження (через індуктивний датчик) як в часовій, так і в частотній областях [274]. Оскільки струм, який спостерігався, протікав послідовно із щіткою крізь іскровий проміжок, то цей проміжок, згідно з теоремою компенсації, можна замінити ідеальним джерелом струму.

Будемо вважати ідентичними всі щітки, крім щітки А1, яка іскрить, те саме відноситься до пластин колектора. Тоді потенціали пар пластин, які однаково розташовані (в напрямку обертання колектора) від збігаючих країв однополярних щіток (наприклад, щіток А1 та А2), можна вважати однаковими (наприклад, потенціал пластини 3 дорівнює потенціалу пластини 163). Цьому сприяє вплив вирівнювачів. Оскільки струморозподіл в електричному колі не зміниться, якщо з'єднати між собою точки однакового потенціалу, то секції другої частини двигуна (з секції 161 по секцію 322) виявляються підключеними паралельно секціям, показаним на рисунку 3.4: друга секція – паралельно секції 162, сьома – паралельно секції 167 і т. д. Виключення складають лише потенціали збігаючих країв щіток А1 та А2 (і пластини 1 та 161) оскільки пластина 1 через іскріння підключена до обмотки якоря через ідеальне джерело струму $J(f)$.

Якщо обмежити розгляд тією частиною періоду комутації, протягом якої збігаючий край щітки А1 знаходиться на межі залишення пластини 1, то можна помітити, що перехідні опори збігаючих країв трьох інших щіток на цьому інтервалі часу дуже близькі до нескінченності, а перехідні опори набігаючих країв усіх відповідних щіток на цьому інтервалі часу дуже близькі до сталої величини R_{12} кожний. Вважаючи, що індуктивності всіх секцій однакові і вважаючи те саме відносно активних опорів секцій та об'єднуючи з урахуванням цього точки рівних потенціалів тіл щіток, приходимо до схеми заміщення двигуна РТ-117, яку наведено на рисунку 3.5.

Нехтуючи поодинокими котушками з індуктивностями менш ніж L_{C1} і вважаючи, що $R_{C1} \ll R_{12}$, приводимо цю схему заміщення до вигляду, наведеного на рисунку 3.6.

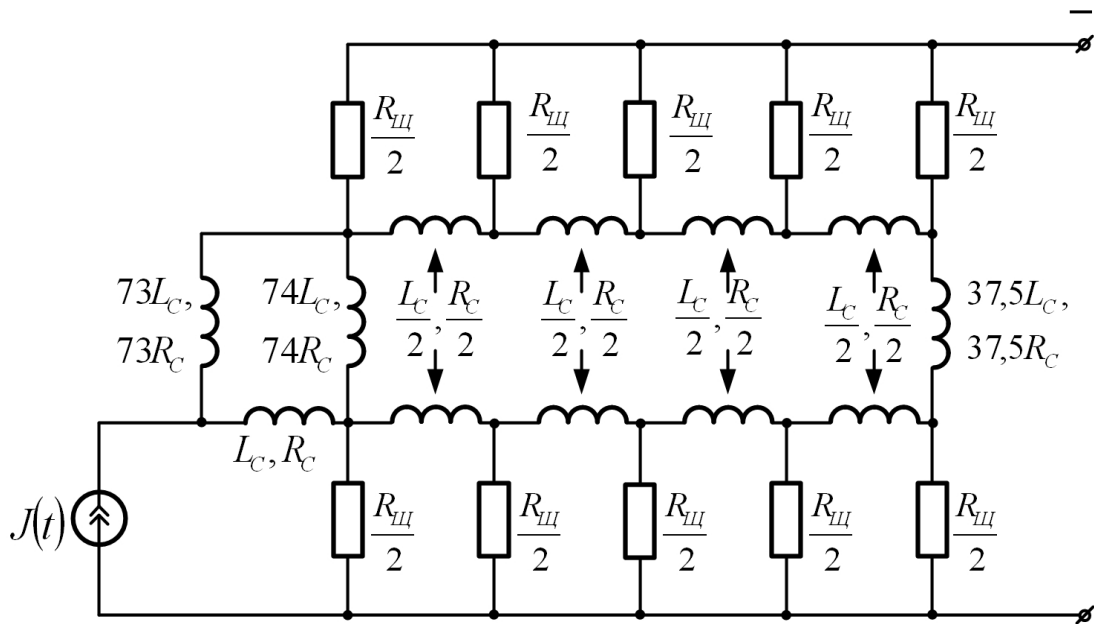


Рисунок 3.5 – Схема заміщення двигуна РТ-117

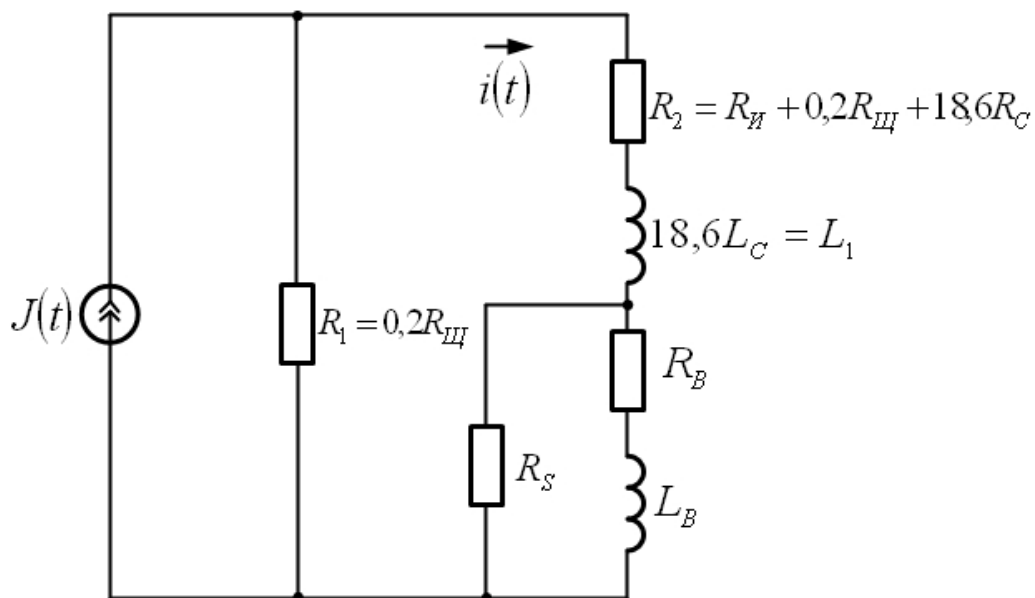


Рисунок 3.6 – Перетворена схема заміщення двигуна

Зображена на цьому рисунку схема включає в себе також внутрішній опір джерела живлення, схему заміщення обмотки збудження у вигляді послідовного ланцюжка , , а також резистор , що шунтує обмотку збудження. Компонента струму живлення, що нас цікавить, створена іскровим струмом

, позначена на рисунку 3.6 як . Для розрахунку цієї компоненти необхідно мати в своєму розпорядженні математичну модель іскрового струму. Вирішенню цього питання присвячений наступний підрозділ.

Математична модель іскрового струму. Загальноприйнята часова структура іскрового розряду є такою: на першій стадії виникає пробій газового проміжку з експоненціальним збільшенням кількості іонів, а на другій стадії відбувається розряд накопичувача енергії (наприклад, котушки індуктивності) через високо іонізований канал.

Часова залежність іскрового струму, що протікає на першій з цих стадій, згідно з роботою [275], є такою:

- де i_0 – початковий «затравочний» струм;
- α – іонізаційний коефіцієнт Таунсенда;
- d – ширина іскрового проміжку;
- β – коефіцієнт репродукування електронів;
- t_0 – 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 перенапруг [276], так і результати сучасних досліджень [277]. Оскільки i_0 є малим, то можна записати таку наближену рівність:

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

(3.30)

На практиці величина сталої компоненти струму в іскровому проміжку складає менш ніж 10-8 від його

пікової величини [276]. З цього витікає, що в рівнянні (30) доданок $i_0 e^{-t/\tau}$ значно менший за i_0 і в подальших викладках ним можна знехтувати. Крім того, для скорочення запису скористаємось позначенням

τ . Фізичним сенсом величини τ є швидкість зростання струму в момент настання пробою. Далі будемо розглядати цю величину як параметр струмового імпульсу, який підлягає подальшому вимірюванню

Для розрахунку струму $i(t)$ як відгуку кола на вхідне діяння $i_0 e^{-t/\tau}$ використаємо частотний метод [278-280, 292]. Спочатку знайдемо комплексну передатну функцію кола (рисунок 3.6) за струмом $i(t)$. Для цього уявимо, що замість $i_0 e^{-t/\tau}$ діє джерело синусоїдного струму з комплексом діючого значення $I_0 e^{-j\omega t}$ на частоті

$\omega = 1/\tau$. Тоді вихідний струм теж синусоїдний і може бути позначений як $I_0 e^{-j\omega t}$. Знайдемо його за правилом розкладу струмів [280, 281]:

Звідси комплексна передатна функція за струмом кола, схему якого зображено на рисунку 3.6, дорівнює

(3.31)

Введемо такі позначення:

(3.32)

З урахуванням цих позначень маємо

(3.33)

Далі визначаємо вираз для спектральної щільності вхідного діяння:

(3.34)

Тепер можна знайти спектральну щільність вихідного сигналу (тобто струму) як

(3.35)

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

(3.36)

Підставивши до останнього інтегралу одержані вище вирази (3.33) і (3.34), отримаємо, що

(3.37)

Цей інтеграл не можна взяти в аналітичному вигляді. Для того, щоб все ж одержати аналітичний вираз для $I(\omega)$, використаємо той факт, що графік частотної залежності модуля $|H(\omega)|$ являє собою дзвоноподібну криву з максимумом на частоті ω_0 і доволі швидким зниженням із зростанням абсолютної величини частоти. В діапазоні малих числових значень частоти ω , де величина $\omega_0 - \omega$ є суттєво великою, можна знехтувати квадратичним доданком у знаменнику функції $H(\omega)$ і записати, що

(3.38)

Поділивши один на другий поліноми чисельника та знаменника, маємо:

(3.39)

Тоді

(3.40)

де $I_1(\omega)$ відповідає першому доданку попереднього рядка, а $I_2(\omega)$ – другому доданку цього ж рядка.

Складова $I_1(\omega)$ струму являє собою промасштабовану з коефіцієнтом K копію вхідного сигналу

$I_2(\omega)$. Складова $I_2(\omega)$ є результатом проходження вхідного сигналу через фільтр з комплексною передатною функцією

(3.41)

тобто через фільтр Бесселя першого порядку [282, 283]. Апроксимуємо її амплітудно-частотну характеристику характеристикою ідеального фільтра нижніх частот, яка являє собою прямокутник з висотою та шириною, яка забезпечує 90 % проходження потужності сигналу з рівномірним спектром. Виходячи з останнього, величина має задовольняти такому співвідношенню:

.3

(3.42)

Невизначені інтеграли у чисельнику та знаменнику цього виразу є такими:

(3.43)

Звідси випливає, що

(3.44)

і що

(3.45)

Тоді рівність (3.42) набуває вигляду

звідки

(3.46)

В обчисленому діапазоні частот апроксимуємо також фазочастотну характеристику (ФЧХ) фільтра. Спочатку розглянемо його точну ФЧХ, яка описується виразом

(3.47)

Використавши відому наближену рівність [283], отримаємо

(3.48)

З урахуванням прийнятих припущень отримаємо, що частотна характеристика (3.41) може бути наближено наведена у вигляді

(3.49)

Використаємо це співвідношення для розрахунку \dots в формулі (3.40):

(3.50)

Якщо спектральна щільність сигналу убиває із зростанням \dots настільки швидко, що за межами діапазону частот \dots її можна вважати нехтовно малою, то межі інтегрування в (3.50) можна прийняти за нескінченні і отримати, що

де \dots – гама-функція.

Врахувавши, що \dots , отримаємо для \dots такий кінцевий вираз:

(3.51)

З урахуванням зробленого вище висновку про вигляд складової \dots маємо такий вираз для вихідного струму \dots кола, схему якого зображено на рисунку 3.6:

(3.52)

3.3 Синтез оптимального приймача іскрової компоненти струму тягового двигуна

Нормативна таблиця, що задає зв'язок між ступенем іскріння (класом комутації) і станом колектора й щіток [273], фактично являє собою опис математично монотонного зв'язку між числовим значенням ступеня іскріння й енергією теплових і електрохімічних явищ у зоні контакту щіток і колектора. Таким чином, амплітуда іскрового струму й енергія, яка виділяється ним у даній зоні, служать однозначною мірою ступеня іскріння. Як показано в роботах [267-269, 284, 292], амплітуда іскрового імпульсу струму,

описуваного моделлю (3.30), наведена в підрозділі 3.2, рівна $I_{\text{иск}}$, а енергія, яка виділяється цим

струмом, пропорційна величині $I_{\text{иск}}^2$. Отже, числові значення параметрів $I_{\text{иск}}$ і $W_{\text{иск}}$ однозначно визначають ступінь іскріння одиночної щітки. Тому становить практичний інтерес вимір їх величин за результатами спостереження іскрового компонента струму, що протікає через джерело живлення [269]. На практиці це спостереження принципово здійсненне шляхом виміру величини, створюваної зазначеним

компонентом напруги $U_{\text{иск}}$ на виході вимірювального трансформатора, первинна обмотка якого включена послідовно із двигуном і джерелом живлення. Ця напруга пов'язана зі струмом співвідношенням

$$U_{\text{иск}} = k_{\text{иск}} I_{\text{иск}},$$
 у якому величину взаємної індуктивності будемо вважати відомою. Таке підключення одночасно забезпечує й автоматичне усунення постійного тягового струму з результатів спостереження. Іншим джерелом перешкод є струми, які проникають в коло живлення, обумовлені неіскровими комутаційними процесами в секціях якоря. Ці струми є квазіперіодичними функціями часу; їхній період обернено пропорційний частоті обертання якоря. Нестрога їхня періодичність обумовлена зміною властивостей щіток, колектора й обмоток під час експлуатації; це дозволяє припустити, що вони можуть бути описані функціями часу, вид яких детермінований, але величини параметрів невідомі. Наявність у колі живлення тягового двигуна обмотки збудження, яка володіє істотною індуктивністю, що й згладжує внаслідок цього можливі високочастотні пульсації, дозволяє використовувати для опису перешкод цього виду на малому інтервалі часу, рівному періоду комутації, квадратичну функцію

(3.53)

При такому підході перешкоди розглянутого типу можна вважати неінформативною адитивною компонентою сигналу, параметри якої підлягають оцінці поряд з параметрами інформативного сигналу

й необхідні для одержання оцінок останніх, але самі корисної інформації про іскріння не містять. Нарешті, третім джерелом перешкод є білий гаусівський шум, обумовлений тепловими флуктуаціями струму у вимірювальному колі [285, 286], що мають спектральну щільність потужності

(3.54)

Враховуючи всю сукупність викладених відомостей, приходимо до формулювання завдання виміру параметрів іскрового струму як завдання спільної оцінки інформативних і неінформативних параметрів сигналу, спостережуваного на тлі адитивного білого гаусівського шуму.

подамо вхідний сигнал обладнання приймання й обробки іскрового сигналу (яке далі для стислості будемо називати «приймач») у вигляді

$$, \quad (3.55)$$

де \dots – білий гаусівський шум зі спектральною щільністю потужності, визначеною співвідношенням (3.54).

Оскільки перший доданок виразу (3.55) являє собою сигнальний компонент напруги, використовуємо для неї позначення

$$(3.56)$$

і у зв'язку із цим перепишемо (3.55) як

$$. \quad (3.57)$$

Розв'язуємо завдання оцінки параметрів функції часу відомого виду на тлі білого гаусівського шуму. Як показано в монографії [285], у таких умовах оптимальним у сенсі мінімуму середнього ризику одержання помилкової оцінки є оцінювання параметрів за критерієм максимуму функції правдоподібності, при яким

вектор оцінок необхідно вибрати таким, щоб забезпечити виконання рівності

$$, \quad (3.58)$$

де t_0 і t_1 є відповідно часом початку й часом закінчення виміру.

Оскільки вміст фігурних дужок речовинний і негативний, то рівність (3.58) буде задоволено, якщо виконане співвідношення

$$. \quad (3.59)$$

Переходячи до дискретного часу t_k й уводячи для функцій часу позначення виду \dots , приходимо до відомого методу найменших квадратів [287, 288, 290]:

$$, \quad (3.60)$$

де ; передбачається, що інтервал обраний за Котельниковим [286, 289, 290]. Оцінювані параметри є компонентами вектора і являють собою розв'язки системи рівнянь

$$, \quad (3.61)$$

де – кількість оцінюваних параметрів.
З (3.61) випливає, що

$$, \quad (3.62)$$

Задамо компоненти вектора стосовно до нашого завдання. У безперервному часі сигнал заданий виразом (3.56). Підставляючи туди (3.52), одержуємо

- при :

$$; \quad (3.63)$$

- при :

$$; \quad (3.64)$$

- при :

$$. \quad (3.65)$$

При точній синхронізації початку вимірів з початком відліку часу достатнім є опис, що дається виразами (3.64) і (3.65). У кожному разі вектор невідомих параметрів такий:

$$,$$
 (3.66)

де — знак транспонування.

Знайдемо вирази для вхідних в (3.62) похідних від сигналу за компонентами цього вектора при

:

$$,$$
 (3.67)

$$,$$
 (3.68)

$$,$$
 (3.69)

$$.$$
 (3.70)

З урахуванням співвідношень (3.67)-(3.70) і згідно з виразом (3.62) маємо на інтервалі таку систему рівнянь:

$$,$$
 (3.71)

$$,$$
 (3.72)

$$,(3.73)$$

$$, \quad (3.74)$$

причому

Ця система нелінійна по . Лінеаризуємо її, використавши для початкової ділянки вимірів відому наближену рівність

$$(3.75)$$

Тоді

На початковій ділянці вимірів величини дуже малі, тому квадратичним доданком можна знехтувати й уважати, що

$$(3.76)$$

З цих же міркувань справедлива й інша наближена рівність:

$$(3.77)$$

Перетворюючи з урахуванням цих двох рівностей вираз (3.71), одержимо

Оскільки , то одержуємо замість (3.71), що

(3.78)

Перетворюючи аналогічним чином вираз (3.72) і нехтуючи в ході перетворень доданками виду , одержимо

(3.79)

Аналогічним чином вираз (2.45) перетворимо до вигляду

, (3.80)

а вираз (3.74) – до вигляду

. (3.81)

Рівняння (3.78)-(3.81) утворюють систему рівнянь, складену за методом найменших квадратів для одержання оцінки вектора (3.66). Знайдемо її аналітичний розв'язок. З (3.81) одержуємо, що

, (3.82)

де

(3.83)

Підставивши отримане у вираз (3.80), знаходимо, що

Оскільки $\hat{\beta}_1$, то

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.84)$$

де

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.85)$$

Тепер підставимо (3.84) з урахуванням (3.85) в (3.82). Після простих перетворень одержуємо, що

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.86)$$

де

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (3.87)$$

Зауважимо, що величини $\hat{\beta}_1$ й $\hat{\beta}_2$ визначені тільки результатами спостережень. Для знаходження оцінки величини β_1 підставимо вираз (3.84) для $\hat{\beta}_1$ й (3.86) для $\hat{\beta}_2$ в рівняння (3.78). Наводячи подібні й нехтуючи квадратичними одночасно по β_1 й по β_2 доданками, приходимо до співвідношення

(3.88)

Тепер аналогічним чином підставимо вирази для y у рівняння (3.79). Наводячи подібні члени й

нехтуючи доданком вигляду \dots , приходимо до такого співвідношення:

(3.89)

Звідси

(3.90)

За відомим \dots знаходимо з виразу (3.88), що

(3.91)

При рівномірній часовій дискретизації вхідної напруги приймача маємо дискретизації за Котельниковим [289, 290]. Тоді з виразу (3.83) одержуємо, що \dots , де T – інтервал

Оскільки $\hat{\theta}_i$ й $\hat{\theta}_j$,
 то $\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j = \dots$ (3.92)

Аналогічним чином одержуємо, що $\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j = \dots$ (3.93)

$\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j = \dots$ (3.94)

Урахуємо, крім того, що $\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j = \dots$ (3.95)

$\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j = \dots$ (3.96)

$\hat{\theta}_i - \hat{\theta}_j = \dots$ (3.97)

У підсумку, вирази (3.92) – (3.97), будучи підставлені у формули (3.90) і (3.91) для розрахунків вимірювальних оцінок параметрів θ_i і θ_j , приводять їх до вигляду, зручного при цифровій реалізації раціонального приймача.

Вирази (3.90) і (3.91) являють собою шукані оцінки величин θ_i і θ_j методом максимальної правдоподібності (зведеним у цьому випадку до методу найменших квадратів), отримані за результатами

вимірів напруги на часовому інтервалі, де розташований початковий фрагмент кривої

іскрового струму. Виміри, проведені при, дозволяють тільки уточнити отримані оцінки γ , у принципі, не є необхідними. Така процедура уточнення може служити предметом окремих досліджень.

визначимо структуру раціонального приймача, що формує оцінки величин γ і відповідно до виразів (3.90) і (3.91), а також такого, що визначає за ними ступінь іскріння двигуна. Зазначені два вирази, власне, і задають функціональні зв'язки між величинами оцінок, часовими відліками вхідного сигналу u_k й константами

k й γ . Ці зв'язки відображає верхня частина структурної схеми, зображеної на рисунку 3.7 (часову й амплітудну дискретизацію здійснює аналого-цифровий перетворювач АЦП) [269].

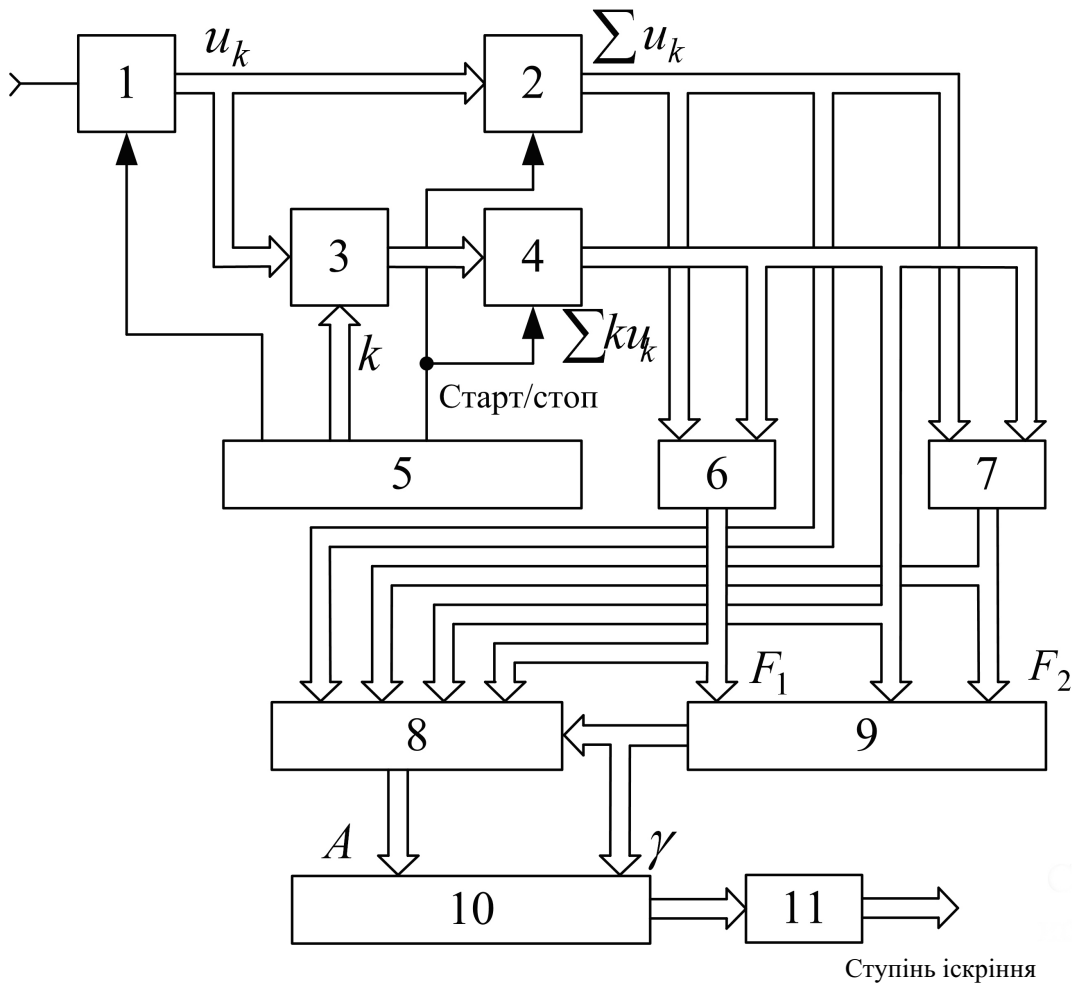


Рисунок 3.7 – Структурна схема оптимального приймача іскрової компоненти струму тягового двигуна:

1 – АЦП; 2, 4 – суматор; 3 – перемножник; 5 – блок керування й зберігання констант; 6 – обчислювач γ ; 7

– обчислювач γ ;

8 – обчислювач F_1 ; 9 – обчислювач F_2 ; 10 – обчислювач амплітуди струмового імпульсу γ ; 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 \oplus , і пари «перемножник-суматор», яка здійснює

операцію \otimes , у вигляді обладнань ковзного в часі обчислення на базі лінії затримки зі зваженими відводами, або, іншими словами, у вигляді нерекурсивного фільтра [282]. З практичної точки зору такий варіант може виявитися переважніше, тому що в ньому за рахунок деякого ускладнення схеми різко знижені вимоги до швидкодії процесора й відкривається можливість використання сучасних процесорів паралельної архітектури.

3.4 Нейромережна динамічна модель пристрою оцінки ступеня іскріння тягових двигунів

Як визначено раніше, сигнал на вході приймача $u(t)$ являє собою суму двох складових (3.55), а саме: сплесків напруги, обумовлених наявністю іскор на колекторі $s(t)$ та завад змінного струму $n(t)$. У свою чергу $n(t)$ складається з двох основних компонент: пульсацій мережі живлення тягової підстанції та змінної складової електрорушійної сили (ЕРС) самоіндукції, яка виникає в процесі функціонування ТЕД. У зв'язку з цим потребує вирішення проблема адекватного відтворення динамічних процесів, які виникають у сталому режимі роботи ТЕД та в умовах їх зміни з урахуванням дії сторонніх факторів. Тобто необхідно розробити динамічну функціональну модель тягового двигуна постійного струму, яка дозволяє отримувати поточні значення основних електромеханічних показників його роботи в реальному масштабі часу [299, 303].

Виконаємо аналіз основних положень класичної теорії електричних машин. Так, основною залежністю, яка ставить у відповідність електромагнітний

момент M з основним магнітним потоком Φ в повітряному зазорі δ , який припадає на один головний полюс, має такий вигляд [273]:

$$M = \frac{1}{2} \frac{d\Phi}{d\delta} \quad (3.98)$$

де I_a – струм якоря;

Φ – постійна для кожної машини величина, яка, в свою чергу, визначається як

$$\Phi = \frac{U_a}{\omega} \quad (3.99)$$

де p – кількість пар полюсів;

ω – число активних дротів обмотки якоря;

ω – кількість пар паралельних гілок.

Струм якоря I_a обумовлюється напругою живлення U та залежить від електрорушійної сили (ЕРС) самоіндукції E_{sa} , яка виникає як результат переміщення обмоток якоря в магнітному полі й спрямована в протилежному до I_a напрямку, тобто

$$E_{sa} = -L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (3.100)$$

де R_a – повний активний опір кола якоря.

У свою чергу, E_{sa} визначається як сума ЕРС всіх n дротів паралельної гілки, що розташовані під одним полюсом [120]

$$E_{sa} = n \Phi \omega \quad (3.101)$$

де Φ – індукція в повітряному зазорі під l -м дротом протягом полюсного розподілу;

l – довжина якоря;

ω – лінійна швидкість руху.

Перетворюючи вираз (3.98) з урахуванням (3.99) – (3.101) отримуємо залежність створюваного

електромагнітного моменту M_e від потоку Φ , напруги живлення U та індукції

$$M_e = \frac{U - I_a R_a}{\omega} \quad (3.102)$$

Виконаємо аналіз виразу (3.102) з урахуванням необхідності визначення основних електромеханічних показників роботи двигуна постійного струму апріорно встановленого типу.

Так, найбільш неоднозначним питанням теорії електричних машин є моделювання розподілу магнітної

індукції Φ в повітряному зазорі, яким, відповідно до виразу (3.101), обумовлюється ЕРС самоіндукції електричної машини. З одного боку, застосування класичних методів (наприклад, [273]) дозволяє з достатньою для практичних цілей похибкою виконувати розрахунки цього чинника в сталому режимі роботи із застосуванням досить простого математичного апарату. З іншого, інтенсивна зміна режимів роботи ТЕД рухомого складу, вплив технологічних факторів та зовнішніх збуджень вимагає моделювання

динаміки процесів, які відбуваються. Крім цього, необхідно враховувати залежність Φ від динаміки зміни струму в основних й додаткових полюсах, характеристик магнітного поля двигуна, процесів комутації тощо. Розглянемо магнітне поле у повітряному зазорі, на яке припадає 60-80 % повної сили намагнічування в електричній машині, і яке має найбільш складний характер. Теоретичний вигляд форми

кривої розподілу індукції в повітряному зазорі Φ наведений у багатьох публікаціях (наприклад, [273, 291]), але при її моделюванні приймається значне спрощення. Тому, з метою підвищення точності оцінки для

апріорно визначеного типу двигуна, доцільне представлення розподілу Φ як вектора

$\vec{\Phi}$, розмірність якого залежить від потрібної точності у часі дискретної динамічної моделі, яка розробляється, тобто

$$, \quad (3.103)$$

де ω – максимальна частота обертання якоря (Гц);

ω_{\min} – мінімальне кутове значення моделі (n – кількість визначених значень ω на одне обертання якоря при максимальній швидкості). Вираз (3.103), по суті, є частотою дискретизації при моделюванні.

У свою чергу, амплітудне значення індукції в момент часу t визначається струмом основних і додаткових полюсів відповідно до кривої намагнічування з урахуванням гістерезису матеріалу та конструктивних особливостей двигуна. Так, теоретично обґрунтована функція насиченості (Ланжевена) має такий вигляд [294-297]

$$, \quad (3.104)$$

в теорії магнетизму μ_0 , де μ_0 – елементарний магнітний момент; H – ефективне поле; k_B – постійна Больцмана; T – температура. З іншого боку, в роботі [296] наведена функція, яка точніше описує насиченість нелінійних матеріалів,

$$, \quad (3.105)$$

де α – коефіцієнт, який враховує властивості магнітного матеріалу.

З урахуванням викладеного, приймаючи μ_0 , де μ_0 – коефіцієнт пропорційності між струмом полюсів двигуна i та напруженістю магнітного поля двигуна, миттєве амплітудне значення індукції в момент часу t визначається виразом

$$, \quad (3.106)$$

де \mathbf{e}_i – i -й елемент вектора \mathbf{e} , причому $\mathbf{e} = \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_3$.

У свою чергу, значення B_{max} в момент часу t залежить від поточної частоти обертання ротора машини таким чином

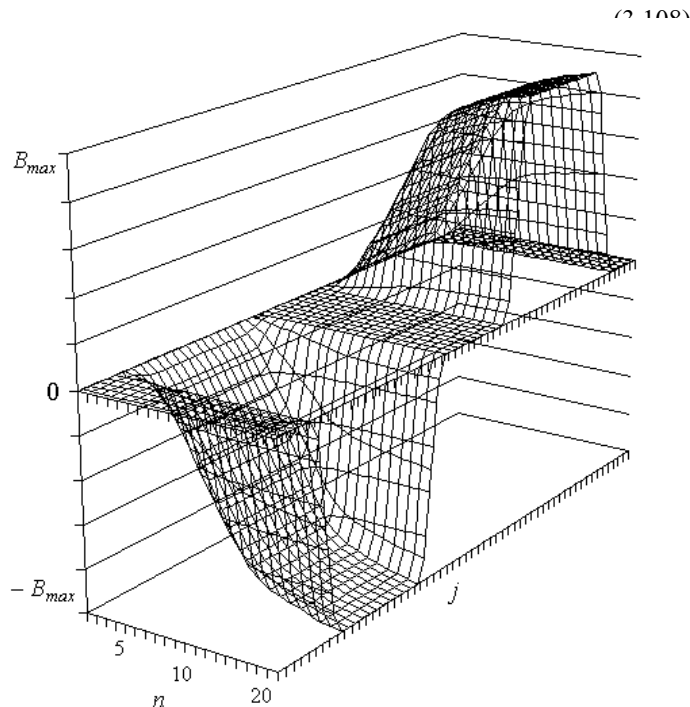
$$B_{\text{max}} = B_m \sin(\omega t) \quad (3.107)$$

тобто реалізована циклічна вибірка значень вектора B .

Результат комп'ютерного моделювання із застосуванням мови програмування C++ (додаток А), відповідно до виразів (3.103) – (3.107), при регульованому нарощуванні значень струму I та швидкості обертання для перших двадцяти обертів якоря машини з однією парою полюсів у тримірному вигляді наведений на рисунку 3.8. Вигляд кривої значень індукції на діаграмі повністю визначається вектором B , який встановлюється апріорно за типом двигуна. В наведеному на рисунку 3.8. прикладі $B = 1$, тобто точність моделювання складає 1о. Далі, миттєве значення ЕРС самоіндукції e , яка виникає в обмотках якоря і залежить від B та швидкості обертання ω . З урахуванням викладеного в роботах [273, 293, 294], найбільш доцільним способом визначення e є моделювання за половинами обмоток, які містяться в окремому пазу якоря.

Введемо дискретну функціональну матрицю M , яка формалізує процес виникнення ЕРС у провідниках напівобмоток, розташованих у пазу j ,

де B_j – постійний для всього якоря;
 B_j – елемент вектора B



розташованого в пазах якоря. Ця матриця враховує особливості розташування провідників в пазах якоря. ЕРС в провідниках напівобмоток, розташованих у пазах якоря, дорівнює нулю.

Рисунок 3.8 – Зміна індукції в повітряному зазорі для двадцяти перших обертань ротора при поступовому нарощуванні струму збудження

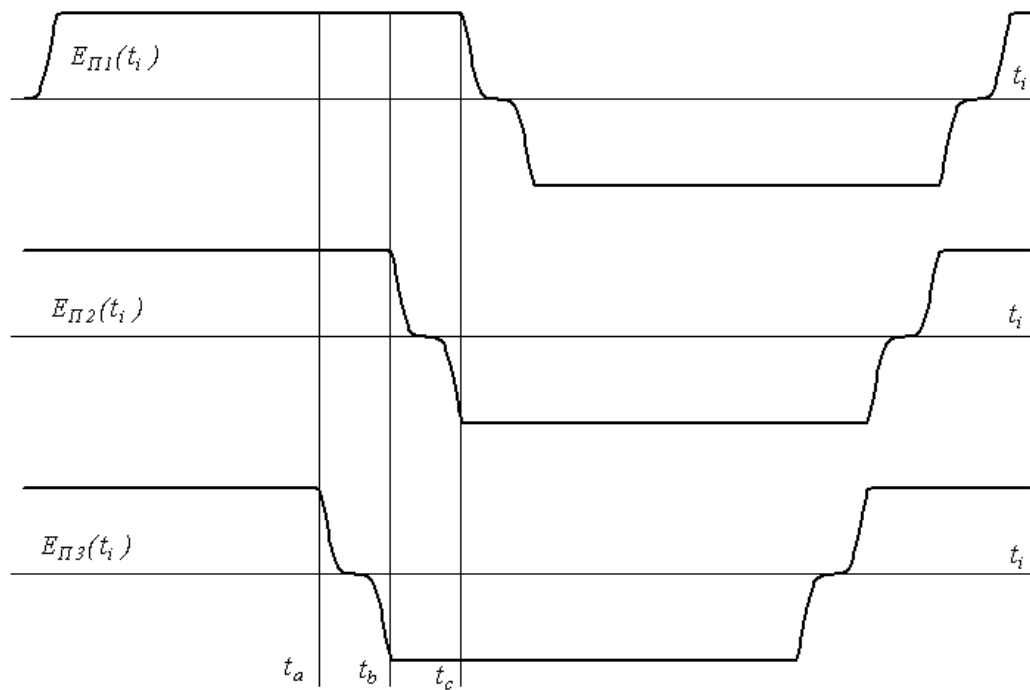
Як приклад на рисунку 3.9, в безперервному вигляді, наведені розраховані дискретні значення

та для двигуна, який має 13 пазів.

Кожна з наведених ЕРС (див. рисунок 3.9) відрізняється за фазою таким чином:

, де – розмір вектора ; – кількість пазів якоря. В

наведеному прикладі, при



З урахуванням конкретної маі

(3.109)

де k – номер колекторної пластини початку обмотки;

m – номер паза, де міститься початкова напівобмотка;

n – номер колекторної пластини кінця обмотки;

p – номер паза, де міститься кінцева напівобмотка;

q – порядковий номер (від умовного нуля) колекторної пластини;

Q – загальна кількість пластин.

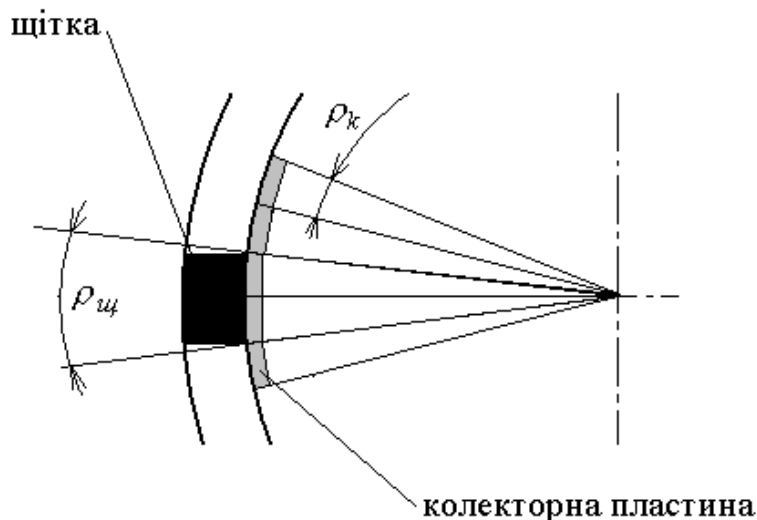
Як приклад, матриця M для двигуна, який має 39 колекторних пластин та 13 пазів, набуває такого вигляду (нумерація пластин та пазів починається з нуля):

У свою чергу процес замикання та розмикання відповідних колекторних пластин при обертанні якоря доцільно формалізувати із застосуванням кутових мір. Тоді для кожної колекторної пластини визначена

кутова міра її початку та кінця за колом обертання, яка відрізняється на α . Кутова міра щітки

β , з урахуванням її встановлення відносно колектора, визначається парю (α, β) – кутова міра початку та

кінця за колом обертання
У процесі обертання якої
фіксується індекс k (стр
напівобмотки, розташована
).



ю щітки,

ся ЕРС

о виразу (3.108)

Рисунок 3.10 – Кутові міри щітки та колекторної пластини

Далі, з урахуванням полярності щіток, до миттєвої вихідної напруги на щітках додається або віднімається кожне значення за колом обертання з урахуванням відповідної зміни поточного значення кутової міри. Зміна знака з додавання на віднімання відбувається, коли належить до плюсової або мінусової щітки.

В ідеальному випадку, коли миттєві значення протилежних напівобмоток збігаються, виконується зміна знака, і результуюча ЕРС подвоюється відповідно до виразу (3.100). Їх різниця приводить до появи змінної складової у вихідній напрузі, тоді

$$, \quad (3.110)$$

де – постійна;

– змінна складова вихідної напруги.

Для перевірки адекватності моделі (3.103) – (3.110) виконаємо розрахунки для конкретного типу двигуна із застосуванням розробленого програмного забезпечення мовою програмування C++ та порівняємо їх з результатами натурних випробувань при його роботі в генераторному режимі з апріорно встановленою швидкістю обертання без навантаження.

Обираємо двигун постійного струму VEB 1146.9 потужністю 600 Вт, який має одну пару полюсів, 13 пазів, 39 колекторних пластин, одну пару щіток, одна з яких встановлена на геометричній нейтралі, друга зсунута на кутову міру однієї колекторної пластини. Вал двигуна з'єднано з валом асинхронного двигуна. Встановлена швидкість обертання – 2690 об/хв.

Результати дискретного моделювання за виразами (3.103) – (3.110) у вигляді безперервних функцій для різних струмів збудження наведені на рисунок 3.11. При моделюванні передбачався сталий режим

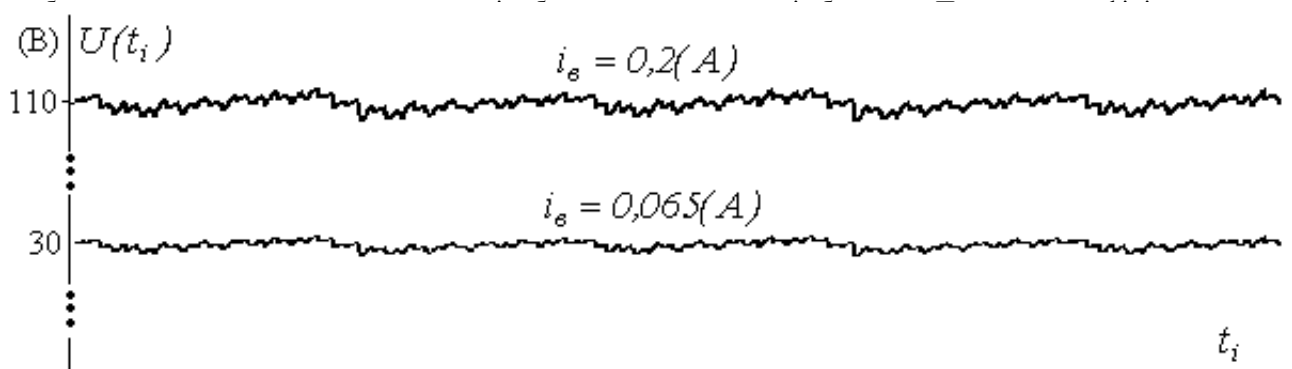
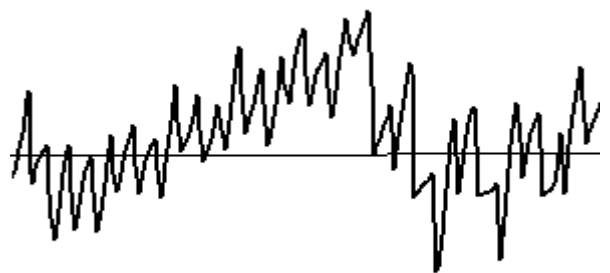
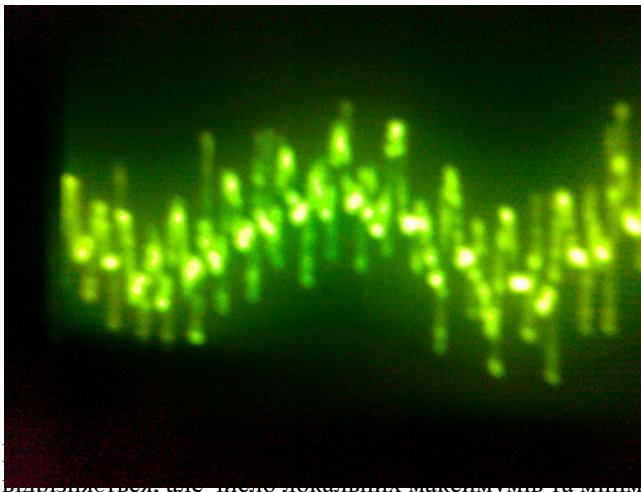


Рисунок 3.11 – Графіки зміни $U_{\text{вх}}(t)$ при різних струмах збудження

Слід зазначити, що середнє значення змінної складової вихідної напруги як в експерименті, так і в результаті моделювання, не перевищувало 0,5 % від постійної. З іншого боку, схожість форм змінних складових може свідчити про адекватність моделювання процесу комутації.

На рисунку 3.12, а наведена осцилограма вихідної напруги $U_{\text{вх}}(t)$, яка отримана в результаті натурних випробувань, на рисунку 3.12, б $U_{\text{вх}}(t)$ – за результатами моделювання.



Форма кривої трохи відрізняється від теоретичної, але це пов'язано з локальними максимумами та мінімумами за один період збігається з кількістю пар колекторних пластин.

Слід зазначити, що розроблені моделі є універсальними, їх адекватність відтворюваним процесам перевірена результатами натурального експерименту при функціонуванні двигуна постійного струму в генераторному режимі.

Розроблене програмне забезпечення мовою програмування C++ (додаток А) виконує однакові функції, відповідно до моделі (3.103) – (3.110). Для відтворення функціонування різних типів електричних двигунів достатньо внести до ПЗ їх конструктивні характеристики. Так, ТЕД 1ДТ-003 має 4 головних та 4 додаткових полюси, 4 щітки; якір має 46 пазів та 322 колекторних пластини, крок за пазами 1-12.

Результат моделювання змінної складової напруги $U_{\text{вх}}(t)$ за період часу приблизно 0,2 с, при сталій частоті обертання ротора 810 об/хв наведений на рисунку 3.13.

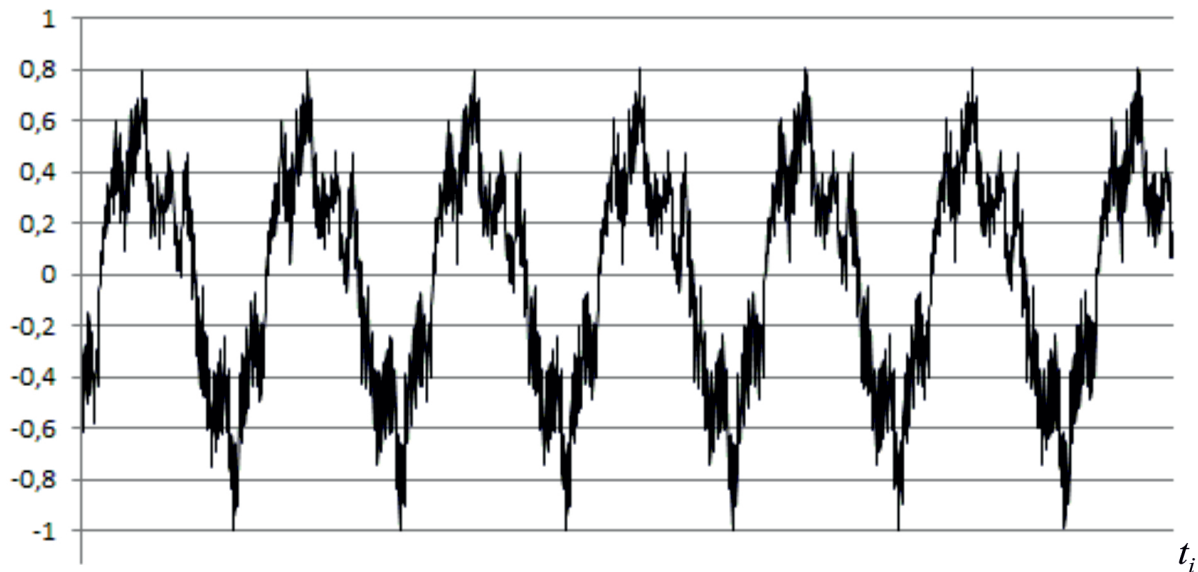


Рисунок 3.13 – Нормоване значення змінної складової

напруги для ТЕД 1ДТ-003

Для моделювання впливу іскріння на змінну складову тягового струму введемо обмеження, вважаючи інваріантність у часі індуктивності та ємності конструктивних елементів ТЕД, а також трансформатору струму, завдяки якому отримується вхідний сигнал. Тоді сигнал $s(t)$ можна зобразити у вигляді множини, яка містить сукупність поодиноких іскор $A_k s_{one}(t_k)$, що виникають в деякі моменти часу t_k і відрізняються амплітудою A_k

$$\overline{s(t)} = \{A_1 s_{one}(t_1), A_2 s_{one}(t_2), \dots, A_k s_{one}(t_k)\}, \quad (3.111)$$

тоді оцінка ступеня іскріння на колекторі ТЕД за проміжок часу Δt є віднесення до відповідного інтервалу потужності цієї множини:

$$S(\Delta t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } |\overline{s(\Delta t)}| < N_1 \\ 1^{1/4}, & \text{якщо } N_1 \leq |\overline{s(\Delta t)}| < N_{1^{1/4}} \\ 1^{1/2}, & \text{якщо } N_{1^{1/4}} \leq |\overline{s(\Delta t)}| < N_{1^{1/2}} \\ 2, & \text{якщо } N_{1^{1/2}} \leq |\overline{s(\Delta t)}| < N_2 \\ 3, & \text{якщо } |\overline{s(\Delta t)}| \geq N_2 \end{cases}, \quad (3.112)$$

де $N_1, N_{1^{1/4}}, N_{1^{1/2}}, N_2$ – кількість іскор за проміжок часу Δt , яка відповідає ступеням іскріння $1, 1^{1/4}, 1^{1/2}, 2$ відповідно.

Таким чином, відповідно до виразів (3.111) та (3.112), функціонування пристрою оцінки ступеня іскріння на колекторі тягового двигуна 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 [298]. Тоді, перейшовши до дискретних сигналів, які отримуються з АЦП приймача (рисунок 3.7), і застосувавши розрахунки коефіцієнта кореляції Пірсона для кожного дискретного моменту часу t_i , маємо

$$r(t_i) = \frac{\sum [s(t_{i-K}) - \frac{1}{K} \sum_{j=i-K}^K s(t_j)] [s_{one}(z_{i-K}) - \frac{1}{K} \sum_{j=i-K}^K s_{one}(z_j)]}{\sqrt{\sum [s(t_{i-K}) - \frac{1}{K} \sum_{j=i-K}^K s(t_j)]^2 \sum [s_{one}(z_{i-K}) - \frac{1}{K} \sum_{j=i-K}^K s_{one}(z_j)]^2}}, \quad (3.113)$$

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

Враховуючи частоту дискретизації АЦП $F_d = 22,1$ (КГц) та тривалість коливального процесу $s_{one}(z_i)$ приблизно 1 мс, кількість значень $K = 22$. Апроксимований кривою дискретний еталонний сигнал поодинокі іскри $s_{one}(z_i)$ наведено на рисунку 3.14.

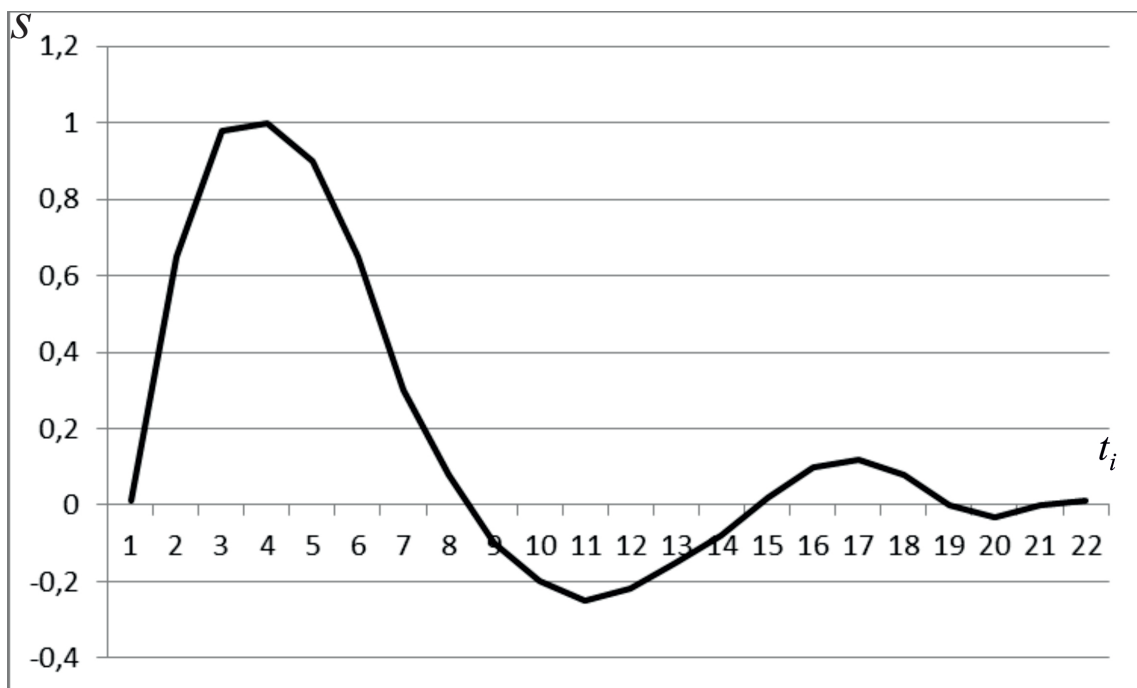


Рисунок 3.14 – Апроксимований дискретний еталонний сигнал поодинокі іскри $s_{one}(z_i)$

Розглянемо складові вхідного дискретного сигналу приймача $s(t_i)$, який являє собою змінну складову струму ТЕД. Основними компонентами цього сигналу є пульсації мережі живлення тягової підстанції, форму яких наведено на рисунку 3.15, а, та змінна складова ЕРС самоіндукції при

відсутності іскріння, моделювання якої відбувається відповідно до виразів (3.103) – (3.110), яку для ТЕД 1ДТ-003 наведено на рисунку 3.15, б. Тоді сигнал $s(t_i)$ є сума цих двох компонент (рисунок 3.15, в).

Результатом впливу іскріння на сигнал $s(t_i)$ є додавання до нього значень дискретної функції $s_{one}(z_i)$ у відповідні моменти часу. Так, наприклад, при наявності п'ятьох іскор, які виникли у випадковий момент часу, сигнал $s(t_i)$ (рисунок 3.16, а) перетвориться до наведеного на рисунку 3.16, б.

Виконавши розрахунки коефіцієнтів кореляції у кожний дискретний моменту часу t_i (2.72), отримаємо кореляційні функції $r(t_i)$, які для двох наведених окремих випадків зображені на рисунку 3.17.

Слід зазначити, що при відсутності іскріння абсолютне значення $r(t_i)$ на перевищує 0,7, а при їх наявності стає більшим ніж 0,85 (рисунок 3.18).

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що для виявлення іскріння необхідно ввести до складу пристрою елемент із ступінчатою характеристикою. При цьому найпростішим засобом є застосування дискретної функції Хевісайда ($\theta[n]$), тоді

$$r'(t_i) = T \cdot \theta[r(t_i)], \quad (3.114)$$

де $r'(t_i)$ – результат виявлення іскріння;

T – значення порогу.

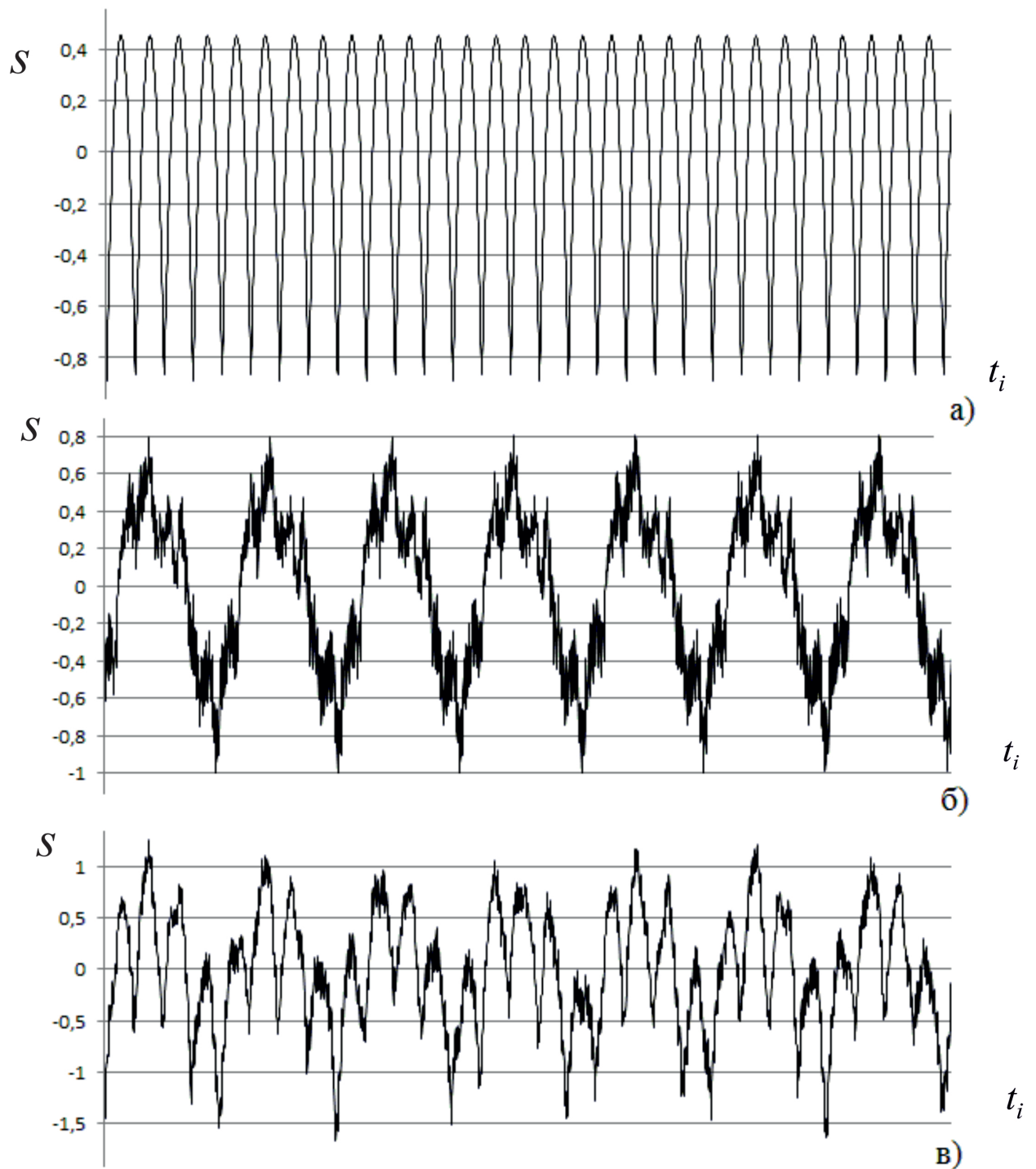


Рисунок 3.15 – Нормовані змінні складові струму ТЕД:
 а) мережі живлення тягової підстанції; б) результати процесу комутації ТЕД;
 в) вхідний сигнал приймача $s(t_i)$ як сума двох компонент

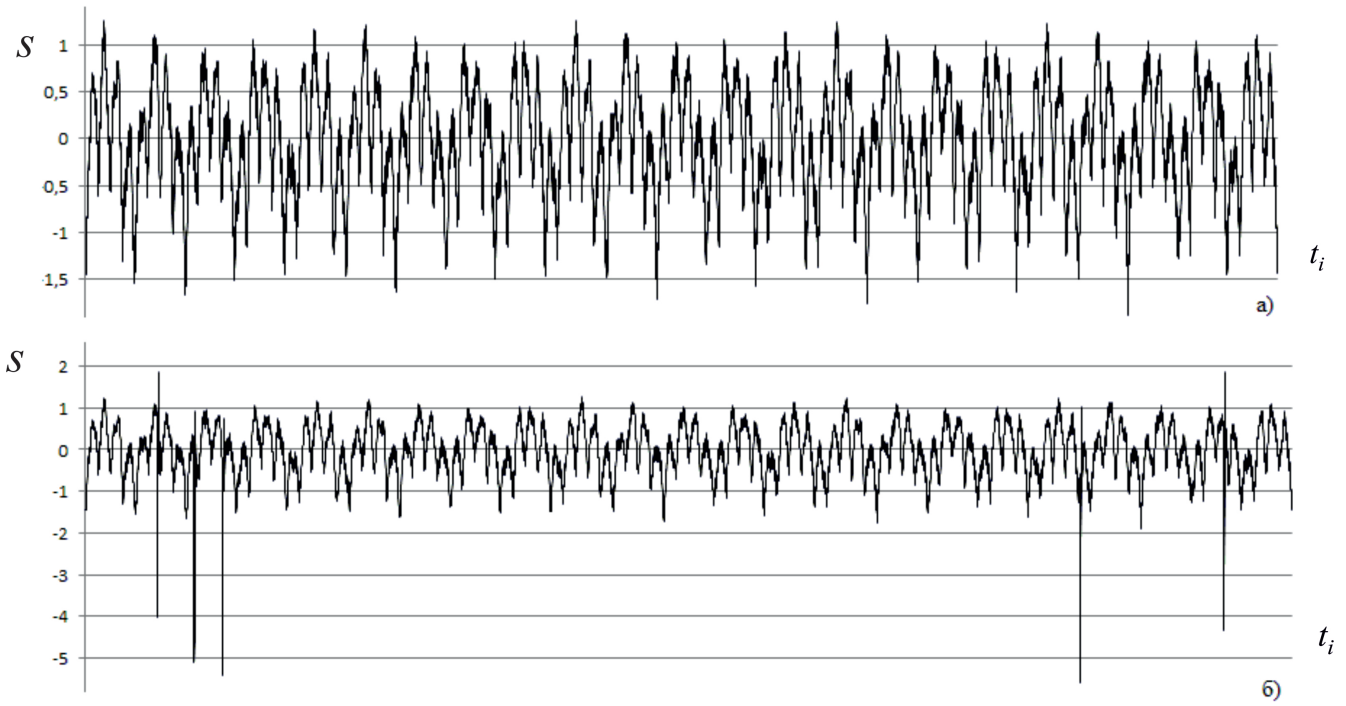


Рисунок 3.16 – Окремі випадки функцій $s(t_i)$:
а) при відсутності іскріння; б) наявності п'ятьох іскор

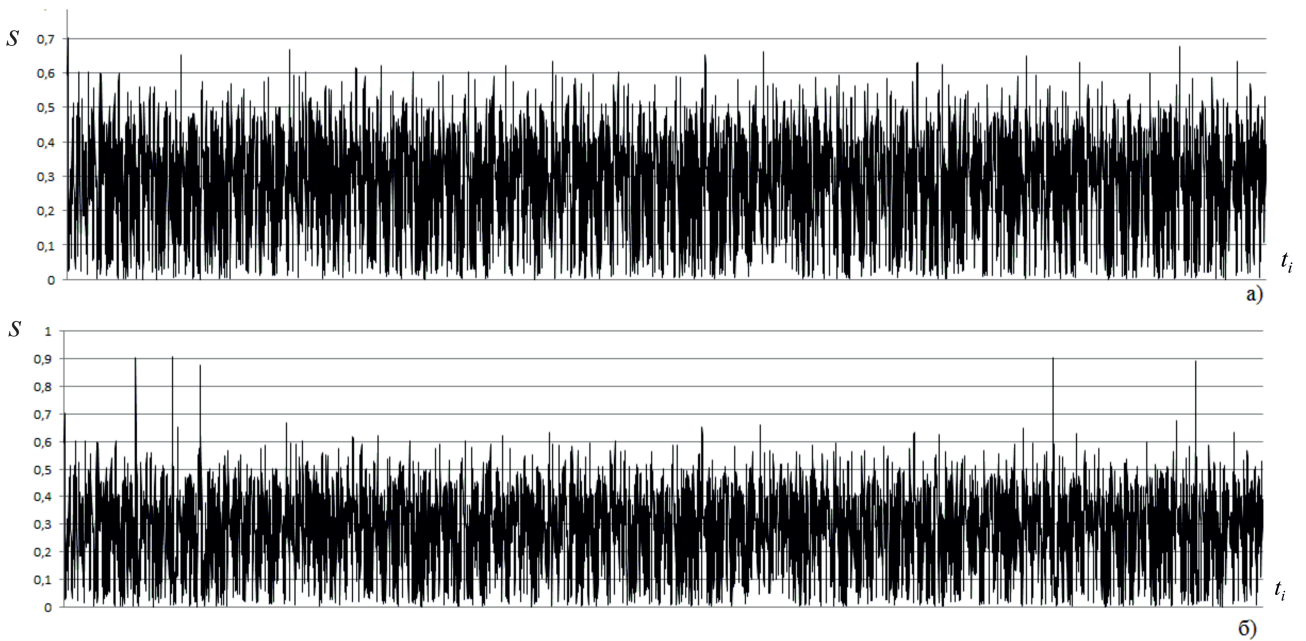


Рисунок 3.17 – Кореляційні функції $r(t_i)$:
а) при відсутності іскріння; б) наявності п'ятьох іскор

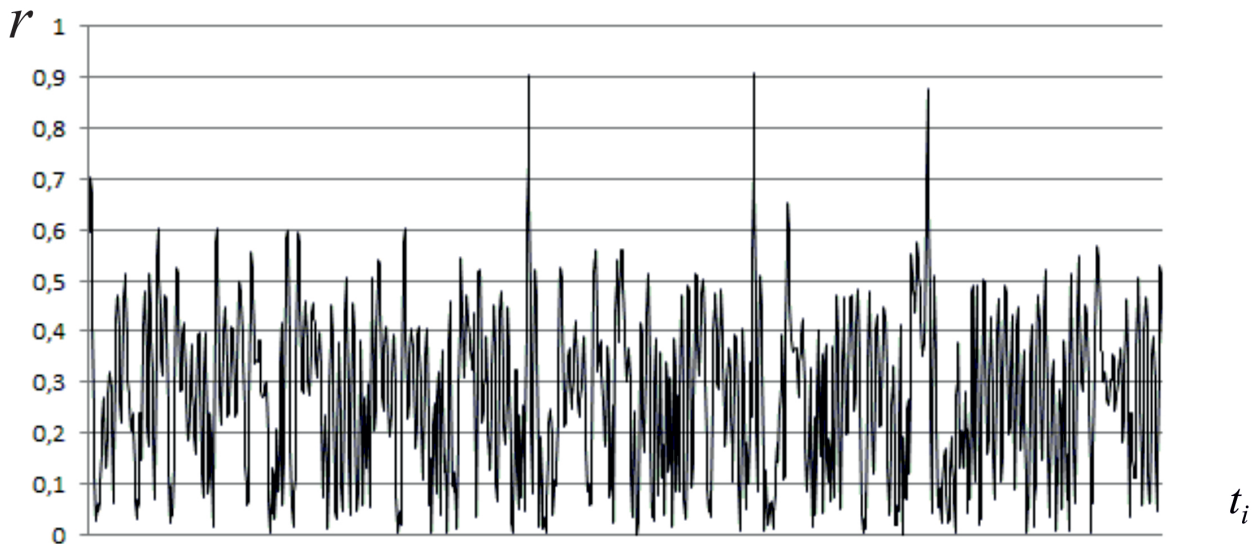


Рисунок 3.18 – Значення функції $r(t_i)$ за перші 0,2 с

Розглянемо декілька результатів моделювання при $T = 0,8$ та різній кількості іскор (рисунок 3.19).

Аналіз та узагальнення результатів функціонування кореляційної моделі виявлення іскріння за значеннями дискретного еталонного сигналу поодинокі іскри $s_{one}(z_i)$ (3.113), (3.114) дозволяє зробити декілька висновків:

- якщо за деякий період часу Δt значення функції $r(t_i) = 0$, то іскріння відсутнє, тобто клас комутації -1 ;

- якщо виявлені поодинокі іскри та їх кількість за період $\Delta t = 1(c)$ не перевищує $10 \div 20$, то клас комутації $-1\frac{1}{4}$;

- у разі значної кількості іскор відбувається їх накладання, при цьому їх результуюча форма не збігається з еталонною $s_{one}(z_i)$, це приводить до збільшення похибки кореляційної моделі. Такий випадок наведено на рисунку 3.19, в, коли в сигналі $s(t_i)$ наявні 30 іскор, а виявлено 27.

З урахуванням останнього, для визначення наступних класів комутації відповідно до (3.112), перейдемо до спектральних характеристик вхідного сигналу. Так, результатом дискретного перетворення Фур'є сигналу $s(t_i)$, який не містить іскор, є комплексний вектор $S(k)$:

$$S[0] = \sum_{n=0}^{N-1} s(t_i) e^{-\frac{2\pi j}{N} kn}, \quad (3.115)$$

де $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, N – кількість компонент перетворення.

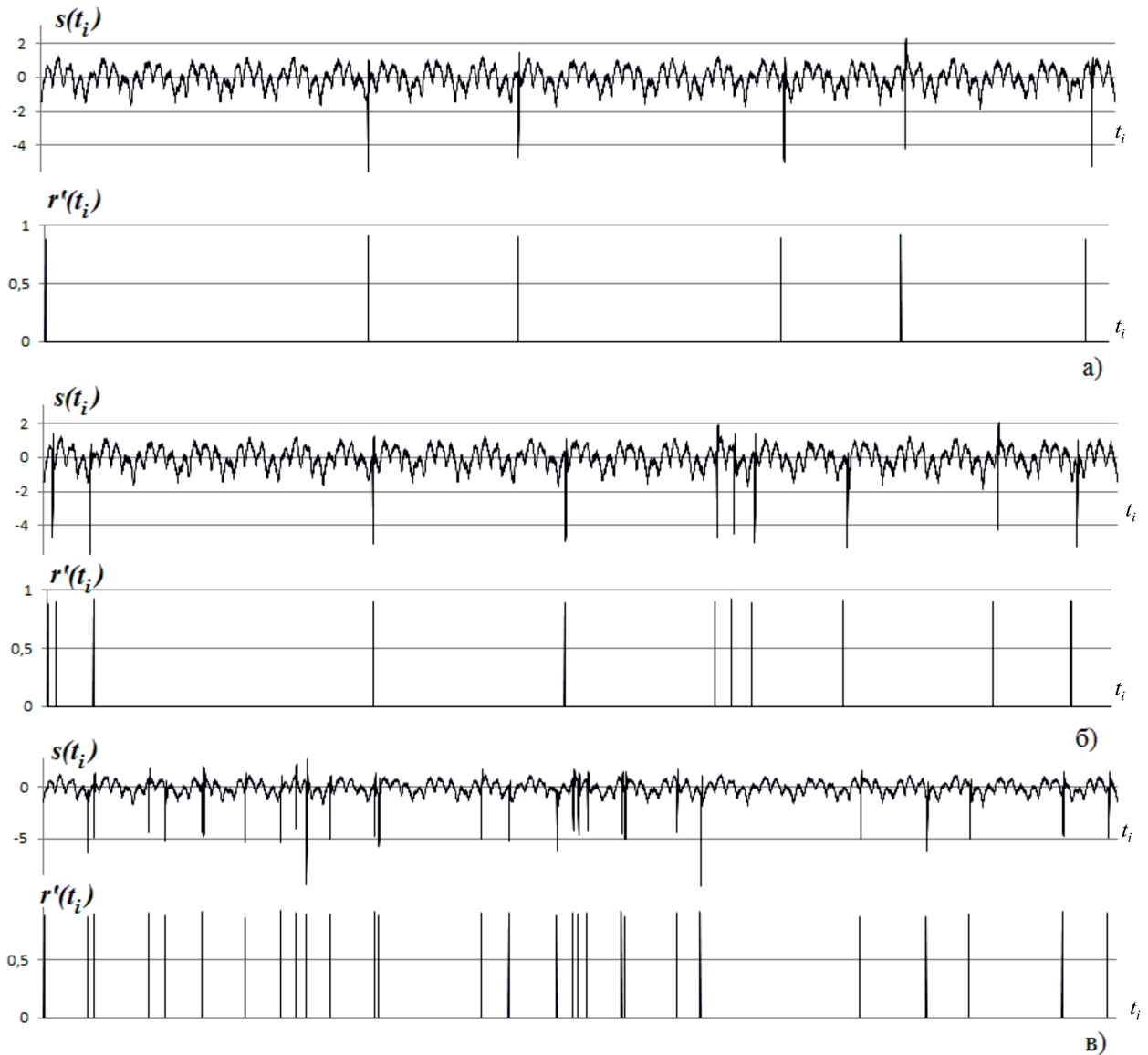


Рисунок 3.19 – Функції $s(t_i)$ та $r'(t_i)$ при кількості іскор 5, 10 та 30 відповідно

Для $s(t_i)$, наведеного на рисунку 3.17, а модуль реальної частини $S[k]$ набуває вигляду, який зображено на рисунку 3.20. Основні компоненти спектра: пульсації мережі живлення, частота обертання ротора та їх гармоніки. Але основним чинником є те, що нульова компонента спектра дорівнює нулю: $S[0] = 0 + j0$, тобто в сигналі відсутня постійна складова. Це обумовлено, як зазначено раніше, застосуванням трансформатора струму. З іншого боку, сигнал поодинокі іскри $s_{one}(z_i)$ не симетричний відносно осі часу, а беручи до уваги те, що іскріння виникає під збігаючою щіткою, то вони завжди матимуть однакову полярність. Як наслідок – при наявності іскріння у вхідному сигналі $s(t_i)$ буде з'являтися постійна складова. Оцінимо залежність нульової компоненти спектра $S[0]$ від кількості іскор N .

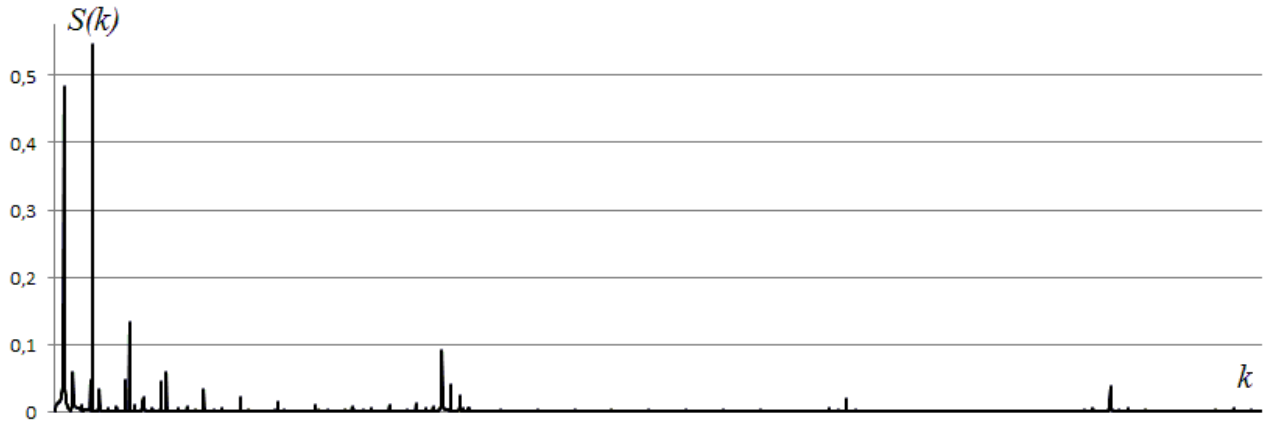


Рисунок 3.20 – Модуль реальної частини спектра вхідного сигналу при відсутності іскріння

Отримані в результаті моделювання дані за період 1 с наведені на рисунку 3.21.

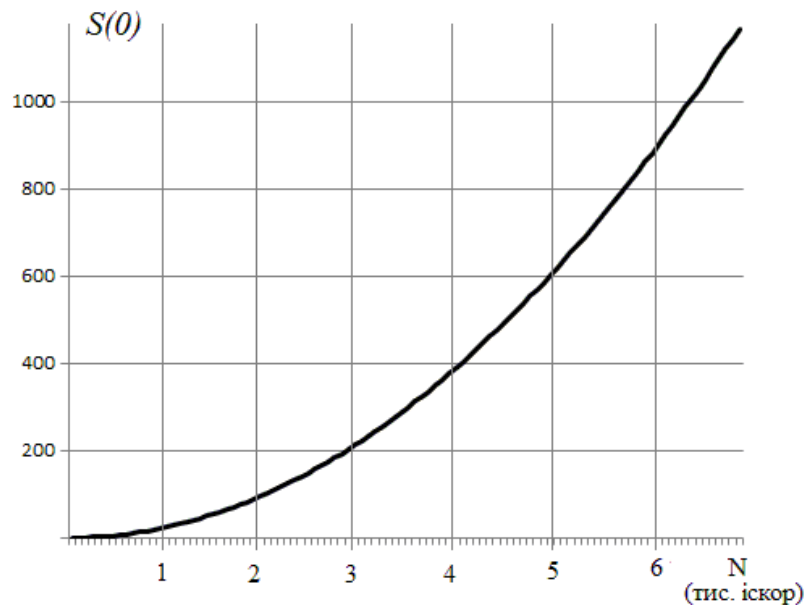


Рисунок 3.21 – Залежність нульової компоненти спектра $S[0]$ від кількості іскор N

З рисунка випливає, що залежність має нелінійний характер. Крім цього, до функцій моделі входить виконання класифікації відповідно до виразів (3.111), (3.112).

У зв'язку з цим доцільно застосувати нейромережний елемент [299, 300, 303], на вхід якого подається діюче значення нульової компоненти спектра за відповідний проміжок часу $S[0](\Delta t)$ і який формує вихідний сигнал $N_{\text{НМ}}(\Delta t)$, тобто

$$N_{\text{НМ}}(\Delta t) = \Phi(S[0](\Delta t)), \quad (3.116)$$

де $\Phi(\cdot)$ – функція нейромережного елемента, яка має виконувати класифікацію $S[0](\Delta t)$ і формувати на виході ступінь приналежності до визначеного класу комутації. З урахуванням цього, розглянемо модель тришарової нейронної мережі (НМ) з логістичною функцією збудження

$$(3.117)$$

де – вихід -го нейрона (рисунок 3.22);

– вхідний сигнал нейрона:

$$(3.118)$$

де – ваговий коефіцієнт;

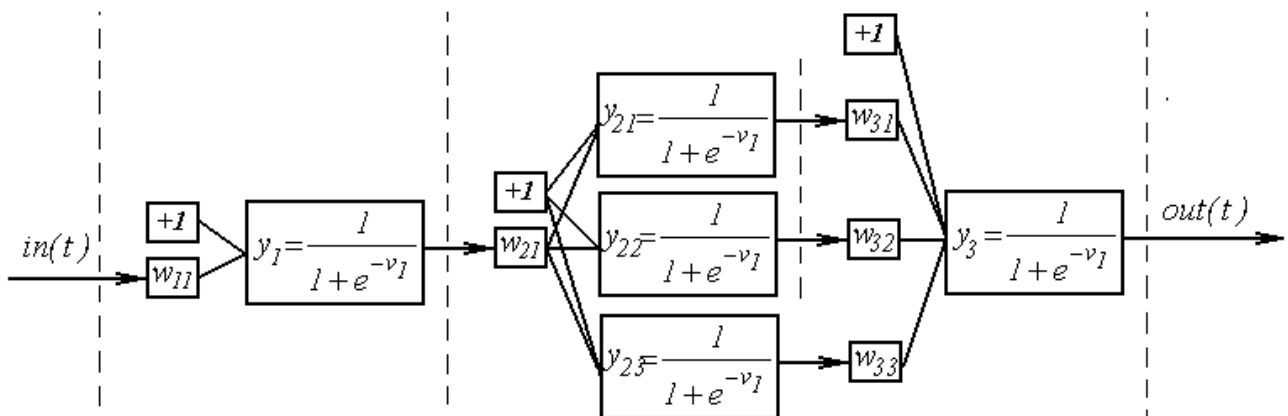
– кількість нейронів у -му шарі;

– значення нахилу логістичної функції -го нейрона.

Для першого шару

– вхід,

– вихід нейронної мережі.



Виконаємо розрахунок вагових коефіцієнтів за модифікованим алгоритмом навчання за методом зворотного поширення помилки з такими критеріями зупинки [300, 303]: значення середньоквадратичної помилки

; максимальна кількість ітерацій локального алгоритму, який виконує розрахунок

градієнтів –

, тотального –

(таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Розраховані значення чинників нейронної мережі

№	1-й шар		2-й шар		3-й шар	
1	0,4016326	-80,51101	0,027337	-84,07764	-0,451175	97,72121 57,06149 -41,67696
2			0,250328	-107,3601		
3			0,378056	123,2122		

Розглянемо процес функціонування нейронної мережі у часі при вхідному гармонічному сигналі. Нехай

, тоді часова діаграма функціонування нейромережного елемента динамічної логіки “НІ” набуває вигляду, який наведено на рисунок 3.23.

Як впливає з рисунка, нейромережний елемент виконує основні функції – інверсію вхідного сигналу, його підсилення та обмеження. З іншого боку, отримане для цієї реалізації значення порога спрацювання випадкове, в наведеному прикладі його значення приблизно дорівнює 0,1 (рисунок 3.24).

Таке явище обумовлене принципом дії процесу навчання, а саме – отримане значення вагового коефіцієнта встановлюється як перше з безкінечної множини, яке задовольняє поставлені умовами.

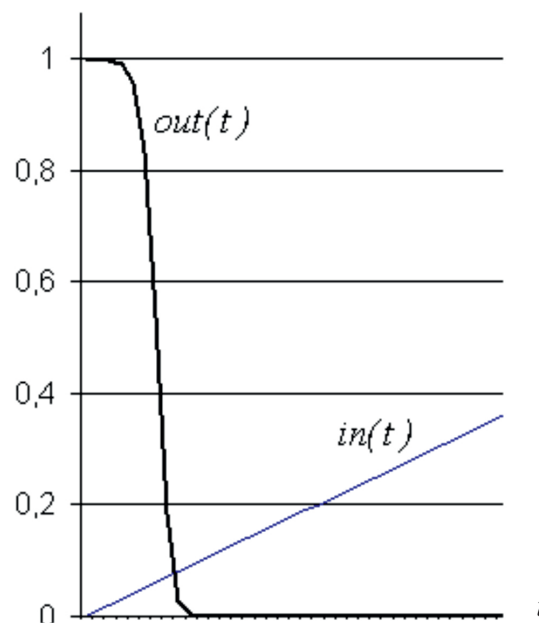
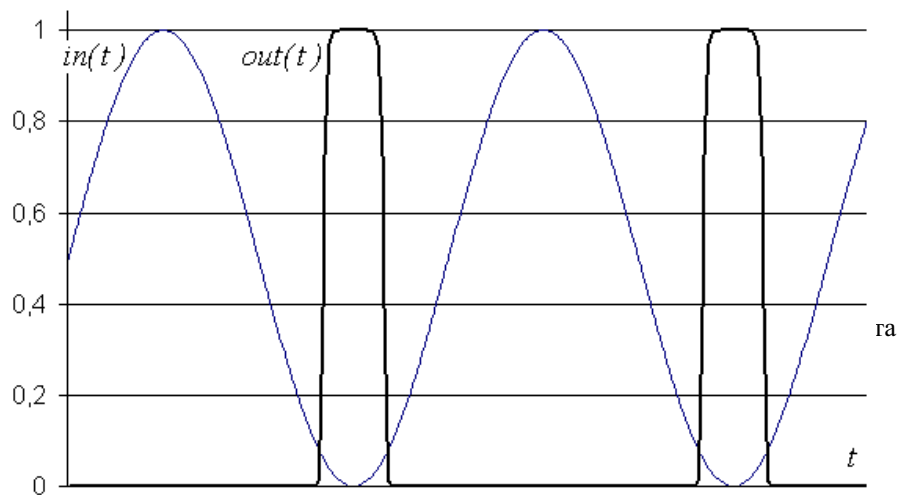


Рисунок 3.24 – Амплітудна характеристика нейромережного елемента динамічної логіки “НІ”

Слід зазначити, що особливістю нейромережної реалізації елементів динамічної логіки є її значна гнучкість та універсальність. Покажемо це на прикладі. Так, якщо потрібно встановити поріг спрацювання, наприклад 0,5 (для отримання симетричної амплітудної характеристики), для цього треба лише уточнити навчальну послідовність. Враховуючи це, виконаємо процес градієнтного розрахунку коефіцієнтів (навчання) за послідовністю, наведеною в таблиці 3.2.

Процес навчання НМ склався з 6-ти ітерацій глобального циклу. В результаті отримані значення нахилу функції збудження та вагових коефіцієнтів наведені в таблиці 3.3.

Часова та амплітудна характеристики при вхідному гармонічному сигналі для нейромережного елемента динамічної логіки “НІ” з уточненою навчальною послідовністю наведені на рисунку 3.25.

Таблиця 3.2 – Уточнена навчальна послідовність нейронної мережі

1,0	0
0,9	0
0,8	0
0,7	0
0,6	0
0,5	0
0,4	1
0,3	1
0,2	1
0,1	1
0	1

Таблиця 3.3 – Розраховані значення чинників нейронної мережі з уточненою навчальною послідовністю

№ нейрона	1-й шар		2-й шар		3-й шар	
1	0,1306767	-82,62920	0,442813	673,2584	0,049795	-8835,533 3951,912 6174,368
2			-0,25339	-1294,389		
3			0,146792	694,9878		

Узагальнюючи наведене, зазначимо, що значення порога спрацювання нейромережного елемента динамічної логіки “НІ” може бути встановлене будь-яке з діапазону [0,1] шляхом збільшення прикладів навчальної послідовності. Обмеженням цього твердження є принципи функціонування НМ наведеної топології (один вхід та один вихід, і відсутність ліній затримки) [299-301, 303], наприклад – мережа не може сформувати різні значення виходу при однаковому вході.

Наведене обмеження унеможливає отримання функціонального елемента, який спроможний формувати вихідну послідовність, яка зсунута на деякий фазовий кут відносно вхідної. Але під це обмеження не підпадає випадок, коли

$$, \text{ або } , \quad (3.119)$$

тобто реалізація інверсії фази вхідного сигналу.

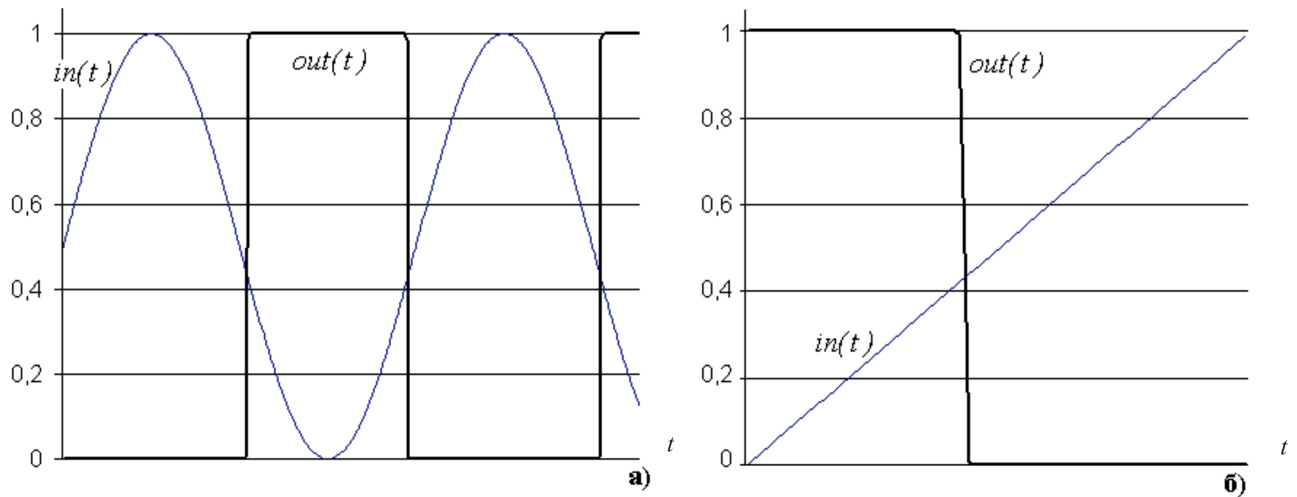


Рисунок 3.25 – Часова (а) та амплітудна (б) характеристики функціонування неймережного елемента динамічної логіки “НІ” з уточненою навчальною послідовністю

З урахуванням наведеного сформуємо навчальну послідовність, яку подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Навчальна послідовність нейронної мережі для реалізації інверсії фази вхідного сигналу

1,0	0
0,9	0,1
0,8	0,2
0,7	0,3
0,6	0,4
0,5	0,5
0,4	0,6
0,3	0,7
0,2	0,8
0,1	0,9
0	1,0

Слід зазначити, що процес навчання мережі з топологією, яка розглядалася (1-3-1), завершувався за

обмеженнями кількості ітерацій. При цьому значення середньоквадратичної похибки за виходом набувало неприпустимо великих значень. Це, очевидно, пов'язано з недостатньою обчислювальною спроможністю мережі з трьома шарами та чотирма нейронами. Для підвищення точності до схеми подано ще один схований шар з трьома нейронами (топологія 1-3-3-1). З урахуванням такого ускладнення

структури отримано значення та вагових коефіцієнтів наведені в таблиці 3.5.

. Розраховані значення нахилу функції збудження

Таблиця 3.5 – Розраховані значення чинників нейронної мережі

№	1-й шар		2-й шар		3-й шар		4-й шар	
1	-0,2799	7,6449	-0,0662	-13,687	-0,3668	-2,84 -2,809 -2,853	0,4863	-228,27 -164,99 -16,146
2			-0,2355	-1,6884	-0,4056	-0,3484 -0,3426 -0,3432		
3			0,0681	30,16	-0,48997	-10,783 -10,573		

						-10,674		
--	--	--	--	--	--	---------	--	--

Часова діаграма функціонування елемента динамічної логіки “НІ”, при $f_{Д} = 0,015$, наведена на рисунку 3.26.

Таким чином, збільшення структури НМ та формування відповідної навчальної послідовності (див. таблицю 3.5) дозволило виконати синтез нейромережної моделі елемента, який з незначними перетвореннями

реалізує безперервну функцію $y = 1 - x$ (див. рисунок 3.26).

Розглянемо отримані похибки моделі в частотній та фазовій площині. З урахуванням можливої її реалізації у пристроях мікропроцесорної техніки відповідно до структури, наведеної на рисунку 3.27, введемо чинник

α – частота дискретизації ЦАП та АЦП.

Аналіз характеристик (див. рисунок 3.28) свідчить про те, що в розглянутій реалізації нейромережного елемента динамічної логіки “НІ” лінійність у частотній та фазовій областях спостерігається тільки у

відносно вузькому діапазоні – до 0,015 частоти дискретизації. В діапазоні від 0,1 до 0,45 $f_{Д}$ відхилення

досягають значень до 20%, а від 0,45 до 0,5 $f_{Д}$ елемент практично втрачає свої функціональні властивості

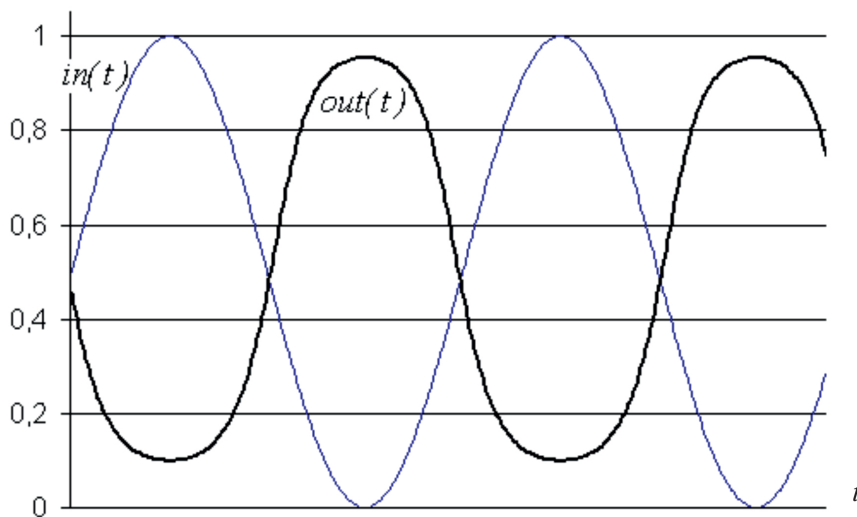


Рис. 3.26. Часова діаграма функціонування елемента динамічної логіки “НІ” при $f_{Д} = 0,015$

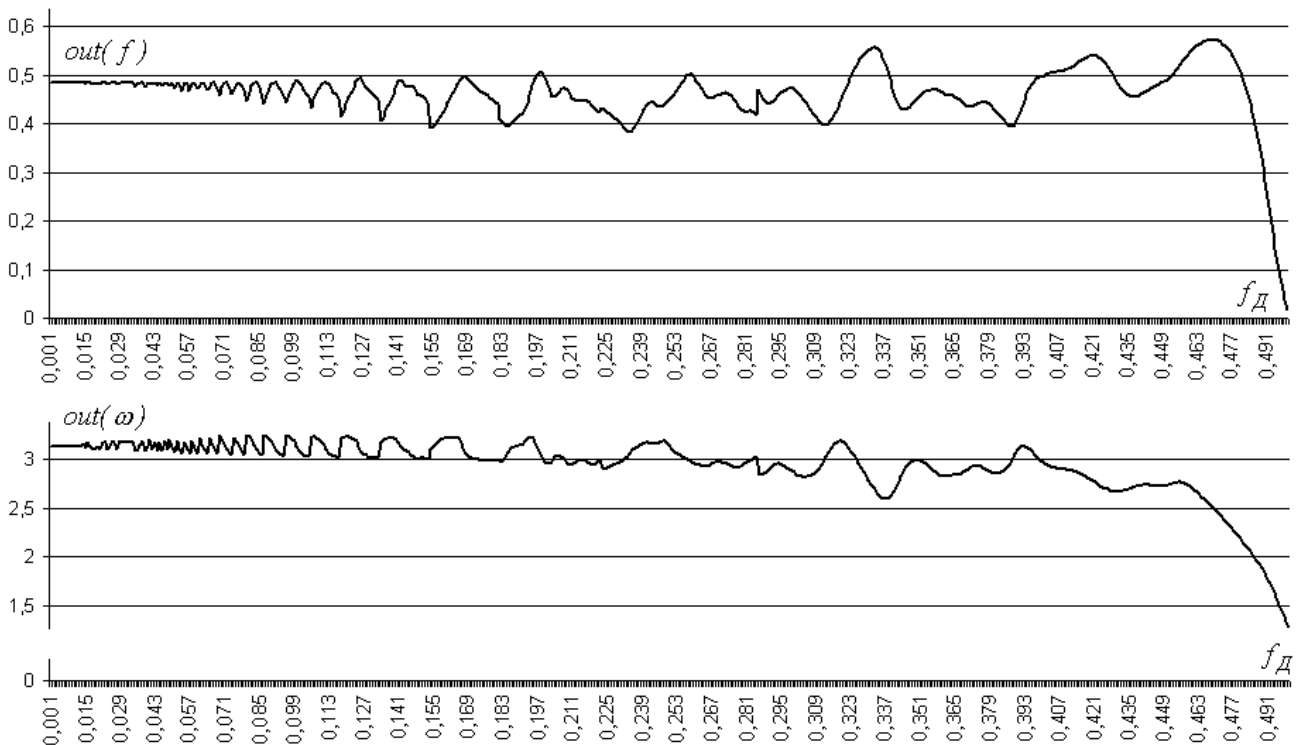


Рисунок 3.28 – Частотна та фазова характеристики реалізації нейромережного елемента динамічної логіки “НІ”

Існує два шляхи усунення наведених недоліків. По-перше, це більш ретельний підхід щодо формування навчальної послідовності (збільшення кількості прикладів та часу навчання). По-друге – застосування швидкодіючих мікропроцесорних пристроїв, які дозволяють встановити високу частоту дискретизації, достатню для обробки потрібних вхідних сигналів.

Таким чином, модель динамічного елемента, призначена для обробки безперервних сигналів, виконує функції логічного елемента “НІ” і побудована на основі застосування методів нейромережного моделювання. При цьому сформульовані функціональні вимоги щодо моделі, сформовані принципи розроблення навчальної послідовності для отримання запланованих результатів та виконано аналіз вихідних сигналів в амплітудній, частотній та фазовій областях.

З урахуванням необхідності роботи елемента для розв’язання задачі визначення ступеня іскріння необхідно передбачити пороговий режим функціонування. Тоді сформовану навчальну послідовність для значення порогу 0,5, наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Навчальна послідовність нейромережного елемента

1,0	0
0,9	0
0,8	0
0,7	0
0,6	0
0,5	1
0,4	1
0,3	1
0,2	1
0,1	1
0	1

В процесі навчання за методом зворотного поширення помилки [300, 303]

отримані значення вагових коефіцієнтів

та нахилу логістичної

функції -го нейрона

(таблиця 3.7). Загальна похибка навчання

близька нулю.

Таблиця 3.7 – Розраховані значення параметрів нейронної мережі

№ нейрона	1-й шар		2-й шар		3-й шар	
1	0,3857387	-47, 03718	-0,04674	7863,442	0,101886	-20,05705 1054,575 -2512,781
2			0,091235	14295,48		
3			-0,34624	55651,28		

При застосуванні нейромережного елемента вираз (3.112) перетвориться до такого:

$$S^{\text{HM}}(\Delta t) = \begin{cases} 1, \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_1}\right) = 1 \\ 1 \frac{1}{4}, \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_{1\frac{1}{4}}}\right) - \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_1}\right) = 1 \\ 1 \frac{1}{2}, \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_{1\frac{1}{2}}}\right) - \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_{1\frac{1}{4}}}\right) = 1 \\ 2, \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_2}\right) - \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_{1\frac{1}{2}}}\right) = 1 \\ 3, \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_3}\right) - \Phi\left(\frac{s[0](\Delta t)}{N'_2}\right) = 1 \end{cases}, \quad (3.120)$$

тобто якщо різниця між вихідними значеннями елемента дорівнює одиниці, то значення $S^{\text{HM}}(\Delta t)$ 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 тягового двигуна (2.72) – (2.76), 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 рисунку 3.29.

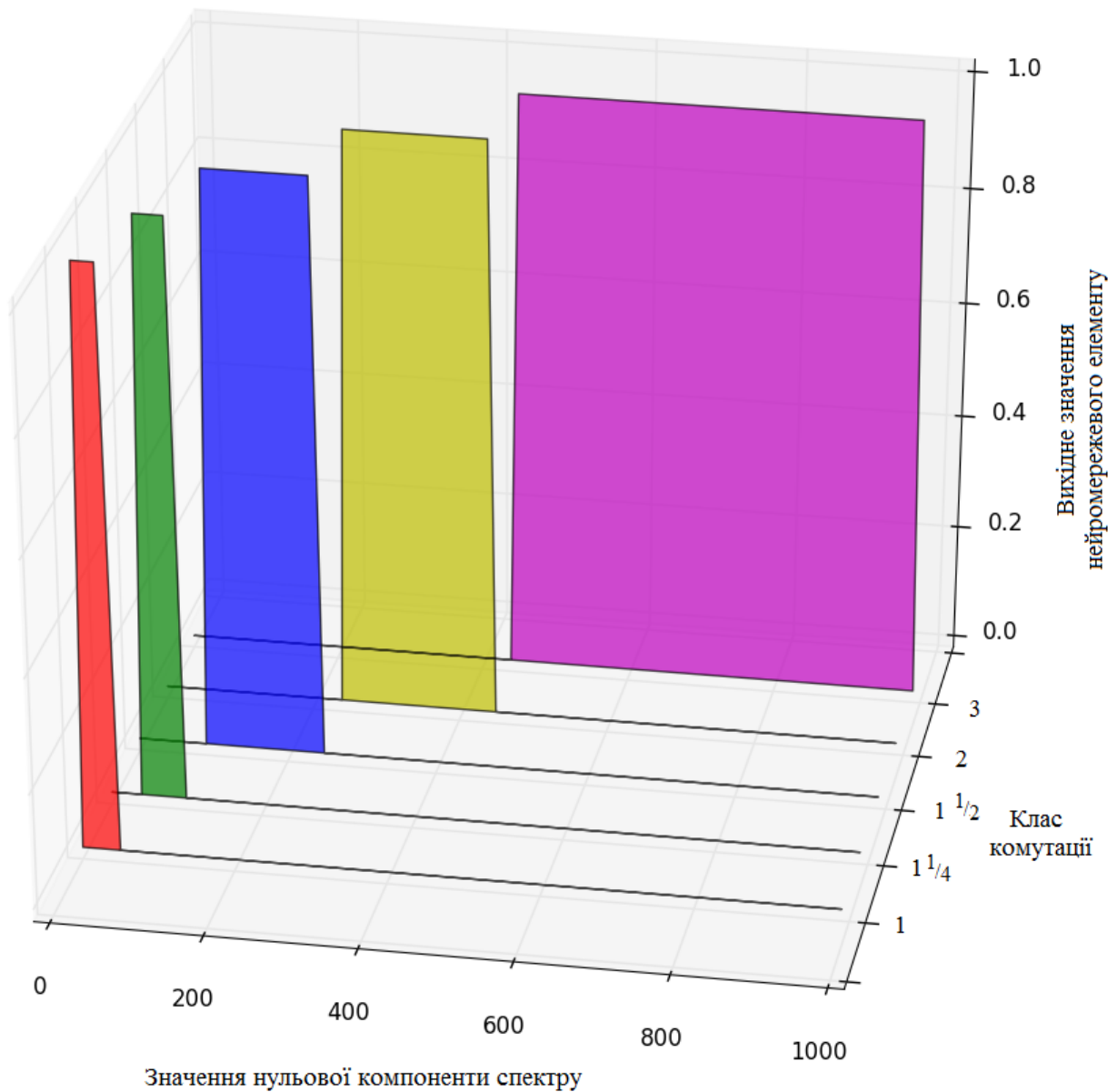


Рисунок 3.29 – Результати функціонування моделі (2.72) – (2.76) залежно від значення нульової компоненти спектра

З урахуванням розроблених моделей, пристрій оцінки ступеня іскріння на колекторі тягового двигуна функціонує наступним чином. Після перетворення вхідного сигналу до цифрової форми (АЦП) виконується перетворення Фур'є (3.115). Абсолютне значення реальної частини нульової компоненти надходить до нейромережного елемента, який виконує класифікацію відповідно до виразу (3.120), і отримується поточне значення ступеня іскріння. Якщо вона має значення 1 або $1^{1/4}$, то функціонує кореляційна модель (3.113), (3.114), виконуючи аналіз за кожним випадком виникнення поодинокі іскри.

Висновки до розділу 3

1 Аналіз впливу процесу комутації на часову структуру струму живлення електродвигуна дозволив встановити, що струм, що протікає через джерело живлення, дійсно містить складові, що залежать від часу та визначаються змінними в часі процесами, які протікають у просторовій області контакту щіток і колектора.

2 Запропоновано схему заміщення ТЕД, що дозволило розглядати його як тракт поширення електричних коливань, викликаних іскровими процесами в зоні контакту щіток і колектора, що дозволило описати інформативну щодо іскріння компоненту живильного струму.

3 Показано, що процеси, які протікають у зоні контакту щіток і колектора, впливають на тимчасову структуру живильного струму ТЕД, що забезпечило постановку завдання оцінки ступеня іскріння за вимірами цього струму.

4 Розроблена математична модель іскрового струму ТЕД, що дозволяє встановити взаємопов'язаність електромагнітних процесів у двигуні з явищами, які мають місце на поверхнях контакту щіток із колектором та створюють у струмі живлення специфічні складові, які містять інформацію як про ці явища, так і про характер комутації окремих секцій або їх груп. Запропонована модель дозволила розв'язати завдання синтезу раціонального приймача, що забезпечує оцінку параметрів цієї моделі за результатами вимірів живильного струму, і на базі отриманих оцінок, визначення ступеня іскріння на колекторі.

5 Проведено синтез оптимального приймача іскрової компоненти струму ТЕД, що дозволяє у реальному часі одержувати інформацію про ступінь іскріння на колекторі.

6 Теоретично обґрунтована та розроблена нейромережна динамічна модель пристрою оцінки ступеня іскріння ТЕД, яка дозволяє шляхом аналітичного опису іскрової компоненти струму, що протікає крізь джерело живлення електродвигуна, забезпечити можливість наступної оптимальної фільтрації та оцінки параметрів цієї компоненти в умовах дії зовнішніх та внутрішніх завад. При цьому сформульовані функціональні вимоги щодо моделі, сформовані принципи розроблення навчальної послідовності для отримання запланованих результатів та виконано аналіз вихідних сигналів в амплітудній, частотній та фазовій областях. Встановлено, що загальна похибка навчання розробленої моделі близька нулю.

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ. ФУНКЦІОНУВАННЯ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

4.1 Розроблення загальної прогнозної моделі теплового стану тягових двигунів

У наш час на приміському рухомому складі застосовуються ТЕД із самовентиляцією. Оскільки продуктивність вентилятора залежить тільки від роботи ТЕД і ніякому регулюванню не піддається, то при обмежених розмірах і високому використанні потужності ТЕД потрібно їхнє штучне охолодження.

Відомо, що до 40 % пошкоджень ТЕД пов'язане з пробоем ізоляції й міжвиткових замикань обмоток якоря, головних і додаткових полюсів і компенсаційних обмоток [246, 256, 293, 301, 310-312, 329]. Тобто пробій ізоляції – один з основних факторів, що визначають ресурс роботи двигуна.

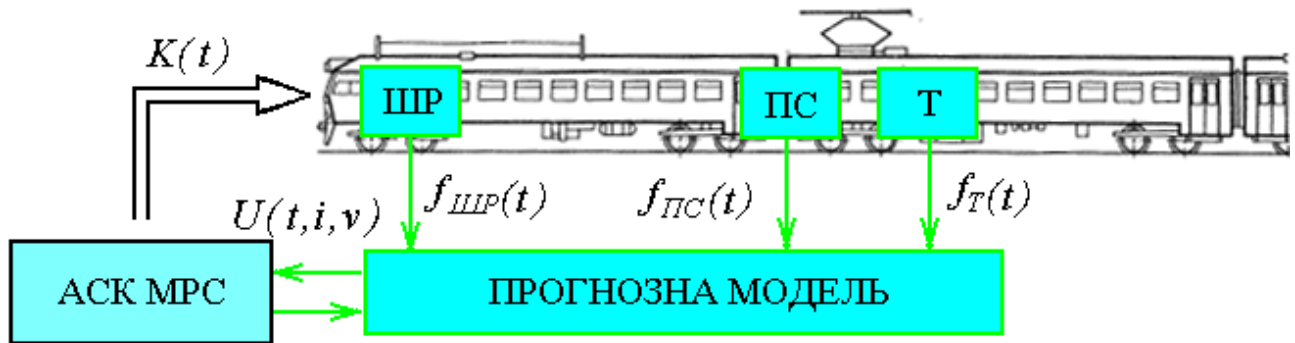
Прийняття рішень в автоматичній системі керування МВРС ґрунтується на статистичних даних, які формуються на основі поточного стану систем та агрегатів, задіяних у цьому процесі. З іншого боку, аналіз окремих положень класичної теорії управління [337, 338] дозволяє зробити висновок про необхідність прогнозного моделювання зміни основних характеристик об'єкта керування для оцінки найбільш раціональних керуючих рішень. З оглядом на це, в роботі наведено обґрунтування необхідності моделювання теплового режиму роботи ТЕД при розробленні АСК МВРС. При цьому задачу вирішено “в цілому”, але для конкретного типу ТЕД, який функціонує на визначеній рухомій одиниці, потрібно враховувати його власні особливості: конструктивні, експлуатаційні, технічні тощо.

Тому однією з актуальних задач є прогнозне моделювання теплових режимів функціонування тягових електричних двигунів МВРС з урахуванням їх власних особливостей.

Розглянемо функціональну структуру моделі, де наведені датчики первинної інформації: швидкості руху (ШР); поточного значення струму (ПС); температури ТЕД (Т), які формують у дискретні моменти часу сигнали:

, та відповідно (рисунок 4.1).

У свою чергу, АСК МВРС може посилати запит до загальної прогнозної моделі на формування вихідного сигналу, який містить дані з можливої температури ТЕД на прогнозований момент часу при відповідному струмі та швидкості руху. Автоматизована система враховує можливе значення перевищення температури при формуванні раціонального керуючого рішення [339, 340] .



Реалізація такої функціональності в загальній прогнозній моделі повинна містити такі складові: актуальну модель поточного стану ; прогнозну модель ; модель попередніх станів , тобто

(4.1)

де - дискретні моменти часу.

З метою мінімізації похибки моделі необхідно врахувати особливості конкретного ТЕД, вплив зовнішніх та внутрішніх факторів, які виникають в процесі руху МВРС. У зв'язку з цим передбачається наступний алгоритм функціонування загальної прогнозної моделі в часі (рисунок 4.2).

В початковий момент часу (блок 1 на рисунку 4.2) функціонують поточна та прогнозна моделі, причому на основі останньої розраховується значення температури ТЕД в наступний момент часу . Під час руху поїзда фіксуються значення , та . В момент часу (блок 2) виконується порівняння

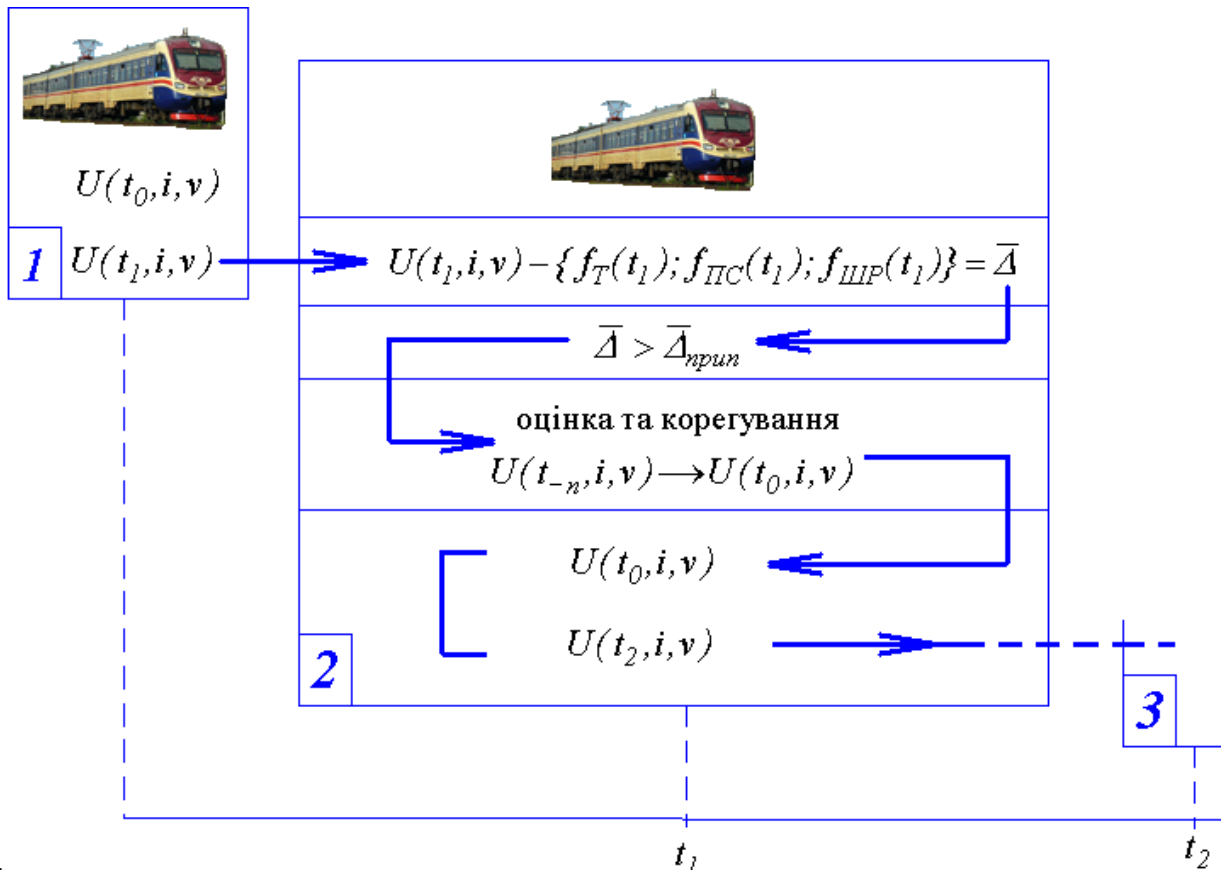
результату функціонування прогновної моделі на попередньому етапі з поточними значеннями

(4.2)

де – отримана функціональна похибка моделі.

Якщо , 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

Слід зазначити, що вираз (4.1) являє собою формалізацію моделі в загальному вигляді. Його деталізацію виконаємо із застосуванням окремих положень теорії нейронних мереж (НМ), з одного боку [341], та теорії електричної тяги, з іншого [75, 89, 191].



функціонує в часі, застосуємо динамічну нейронну мережу типу nn1nn з модифікованим алгоритмом навчання за методом зворотного поширення

помилки [299, 301, 343, 350, 351]. Взявши до уваги те, що припустимий діапазон вхідних та вихідних значень мережі – , введемо

коефіцієнти та – коефіцієнт струму й температури відповідно. Крім цього, вважаємо, що ТЕД з самовентиляцією має лінійну залежність між швидкістю обертання (швидкістю руху поїзда) та тепловіддаванням, тоді

$$, \quad (4.3)$$

де – коефіцієнт швидкості;
 – температура навколишнього середовища;
 – швидкість руху МВРС.

Перша складова виразу (4.3) – результат функціонування динамічної нейронної мережі типу NARX, яка набуває на вході приведеного значення струму та розраховує абсолютне значення температури ТЕД, друга складова враховує вплив швидкості руху МВРС на процес охолодження двигуна внаслідок самовентиляції.

Як відомо [299, 343], 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 тягового електродвигуна 1ДТ.0012 вважаємо, що максимальний робочий струм складає 400 А, максимальна температура – 300 °С (без урахування охолодження).

Тоді первинна навчальна послідовність у вигляді пар: вхідний струм – вихідна температура, яку розгорнуто за вісімнадцятьма дискретними значеннями часу, подана на рисунку 4.3 у

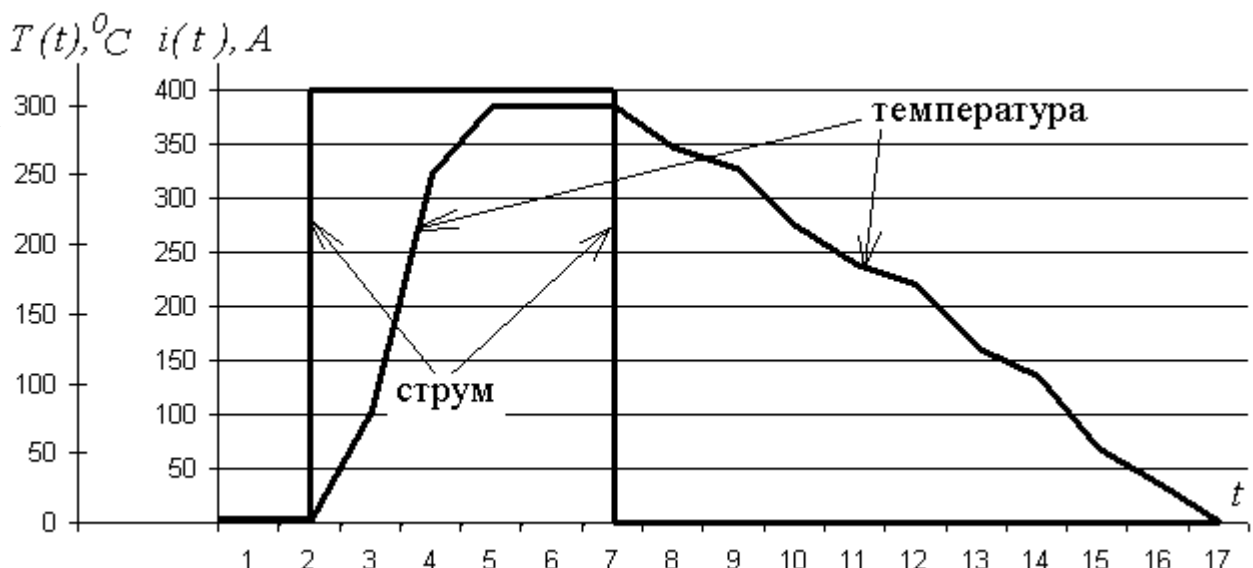


Рисунок 4.3 – Первинна навчальна послідовність

В багатошаровій нейронній мережі, призначеній для реалізації потрібної функціональності, обираємо логістичну функцію збудження нейронів [341]

$$\sigma(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (4.4)$$

де x – індуковане локальне поле нейрона (вагова сума всіх синаптичних входів та порогових значень);

w_{ij} – вихід j -го нейрона.

З урахуванням схованих шарів модель функціонування при прямому розповсюдженні сигналів має такий вигляд [341]:

$$y_k = \sigma\left(\sum_{j=1}^n w_{kj} x_j\right), \quad (4.5)$$

де n – кількість нейронів у k -му шарі;

w_{kj} – значення нахилу логістичної функції j -го нейрону; для

першого шару $w_{kj} = 0$.

Для навчання використовуємо процедуру зворотного розповсюдження в часі [340], з використанням модифікованого алгоритму [339-343]. Множину даних розбиваємо на незалежні епохи, кожна з яких являє проміжок часу

E , загальна енергія середньоквадратичної помилки за епоху [341]:

$$, \quad (4.6)$$

де S – множина індексів i , які відносяться до тих нейронів, для яких визначені бажані відгуки;

δ_i – сигнал помилки на виході нейронів.

Для розрахунку локальних градієнтів виконується одинична зворотна передача [341]

$$(4.7)$$

для всіх $i \in S$ та $j \in S$.

Розрахунок локального градієнту подібний до наведеного в роботах [341-343], при цьому реалізація розгортання алгоритму навчання в часі така:

$$, \quad (4.8)$$

де f' – похідна функції активації нейронів (1),

δ_j – індуковане локальне поле нейрона j .

Корегування вагових коефіцієнтів шару k нейронної мережі, як і у виразі (4.10), виконується відповідно до загального дельта-правила [341]:

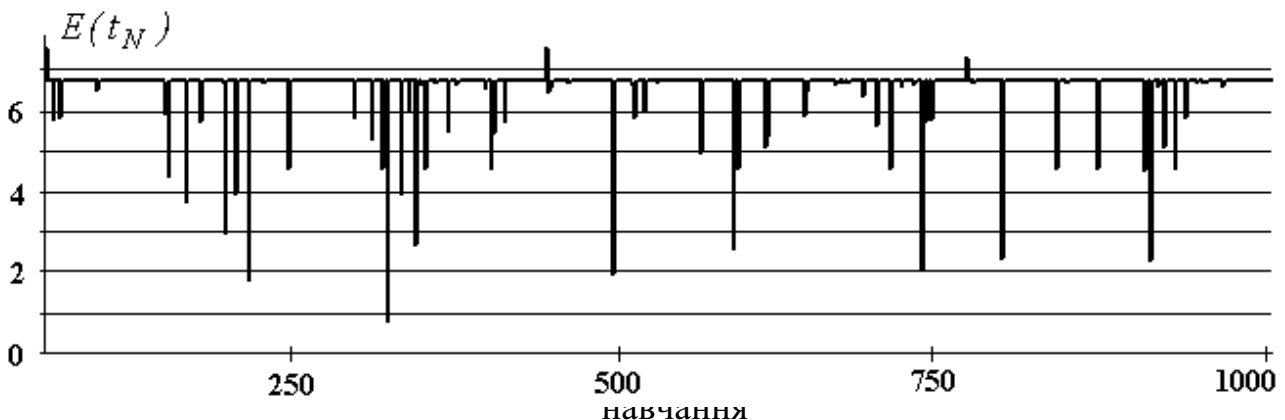
$$, \quad (4.9)$$

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

Вибір структури нейронної мережі NARX здійснюємо наступним чином. Спочатку обираємо мінімальну конфігурацію (з одним зворотнім зв'язком за входом та одним – за виходом, трьома нейронами в першому та другому шарі) та виконуємо її навчання. Якщо отримується неприпустиме значення середньоквадратичної енергії помилки за виходом [301, 342, 343, 388], то ускладнюємо структуру до отримання задовільного значення.

Тоді для мережі з мінімальною структурою процес навчання складався з 1000 ітерацій глобального циклу. Зміну отриманих значень загальної енергії середньоквадратичної помилки за всією послідовністю на кожній ітерації наведено на рисунку 4.4.

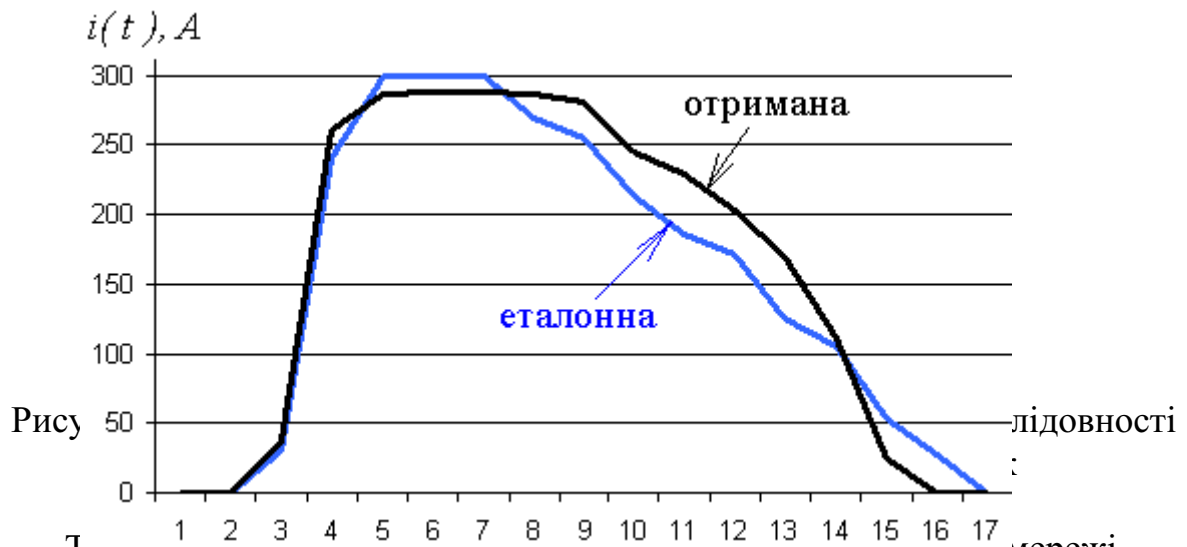
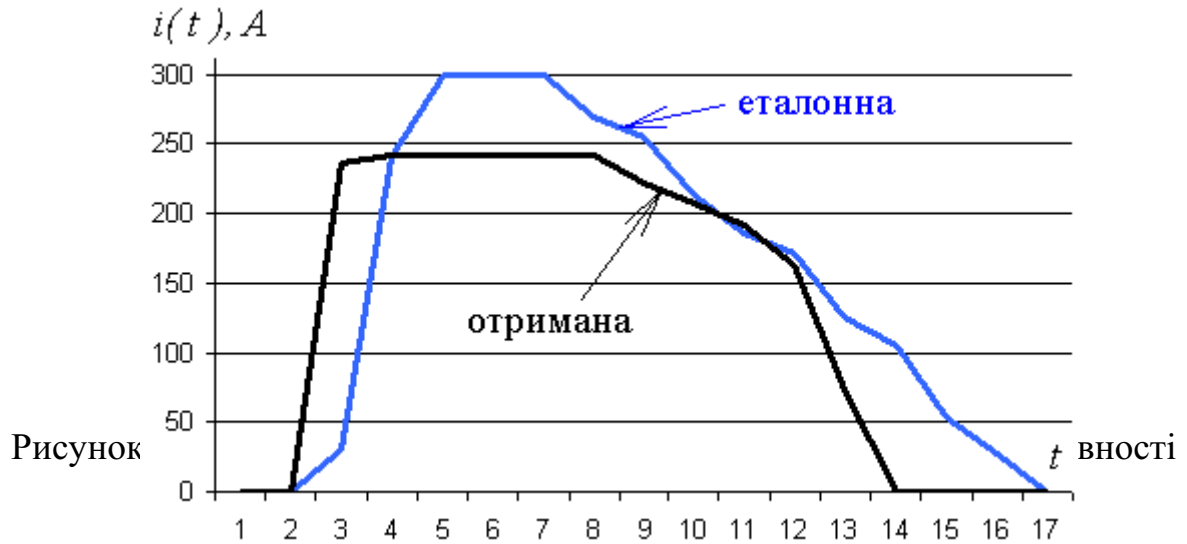
При цьому



Отримана в результаті навчання послідовність за виглядом дещо відрізняється від еталонної (рисунок 4.5).

З рисунка видно, що при мінімальній структурі (по одній лінії затримки за входом та виходом) в нейронній мережі спостерігається зменшення терміну часу на нагрів та охолодження. Таким чином, для випадку, що розглядається, НМ задовольняє вимоги за τ , але не за $\tau_{\text{нагрів}}$ та $\tau_{\text{охолодження}}$. У зв'язку з цим ускладнюємо структуру мережі та проводимо процес навчання.

Як видно з рисунка 4.6, застосування мережі NARX з двома парами ліній затримок задовольняє висунуті вимоги як за формою вихідного сигналу $y(t)$, так і за отриманим значенням помилки:



Таким чином, на попередньому етапі визначена структура мережі

NARX, розраховані значення векторів вагових коефіцієнтів та параметри нахилу функцій активації нейронів (рисунок 4.7). Мережа функціонує в динамічному режимі, вхідним сигналом є значення струму в дискретні моменти часу . Вхідний та вихідний сигнали запам'ятовуються в лініях затримки та подаються на входи - у відповідні терміни часу, як це наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Функціонування ліній затримки в нейронній мережі NARX

	0			
	0	0		
	0	0		
	0			

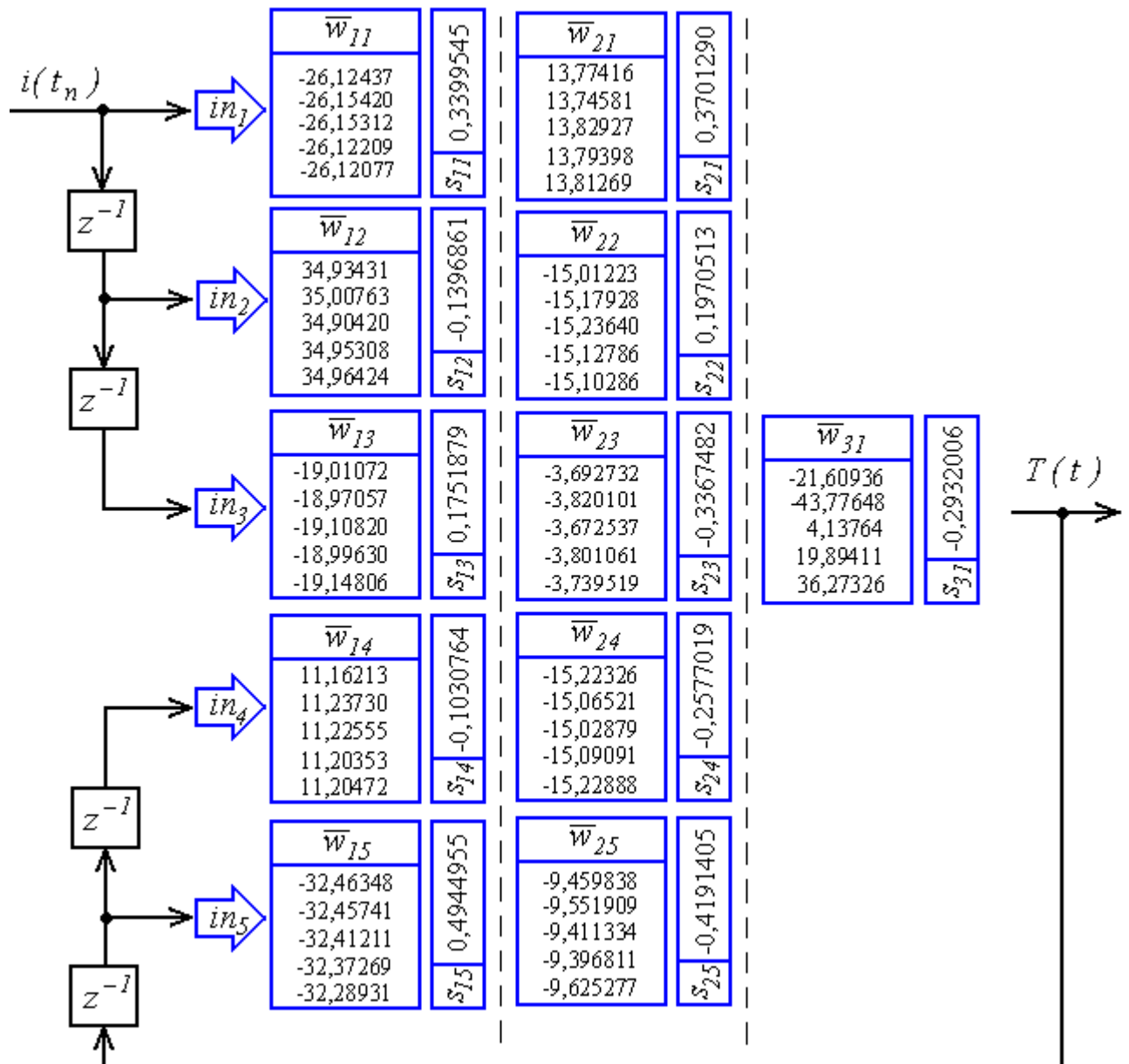


Рисунок 4.7 – Структура мережі NARX з розрахованими значеннями векторів вагових коефіцієнтів та параметрів нахилів функцій активації нейронів

Встановимо початкові умови:

. При рушанні моторвагонної одиниці з місця (

момент часу) значення тягового струму дорівнює 175 А, яке потім зменшується внаслідок зростання швидкості руху та автоматичного переходу

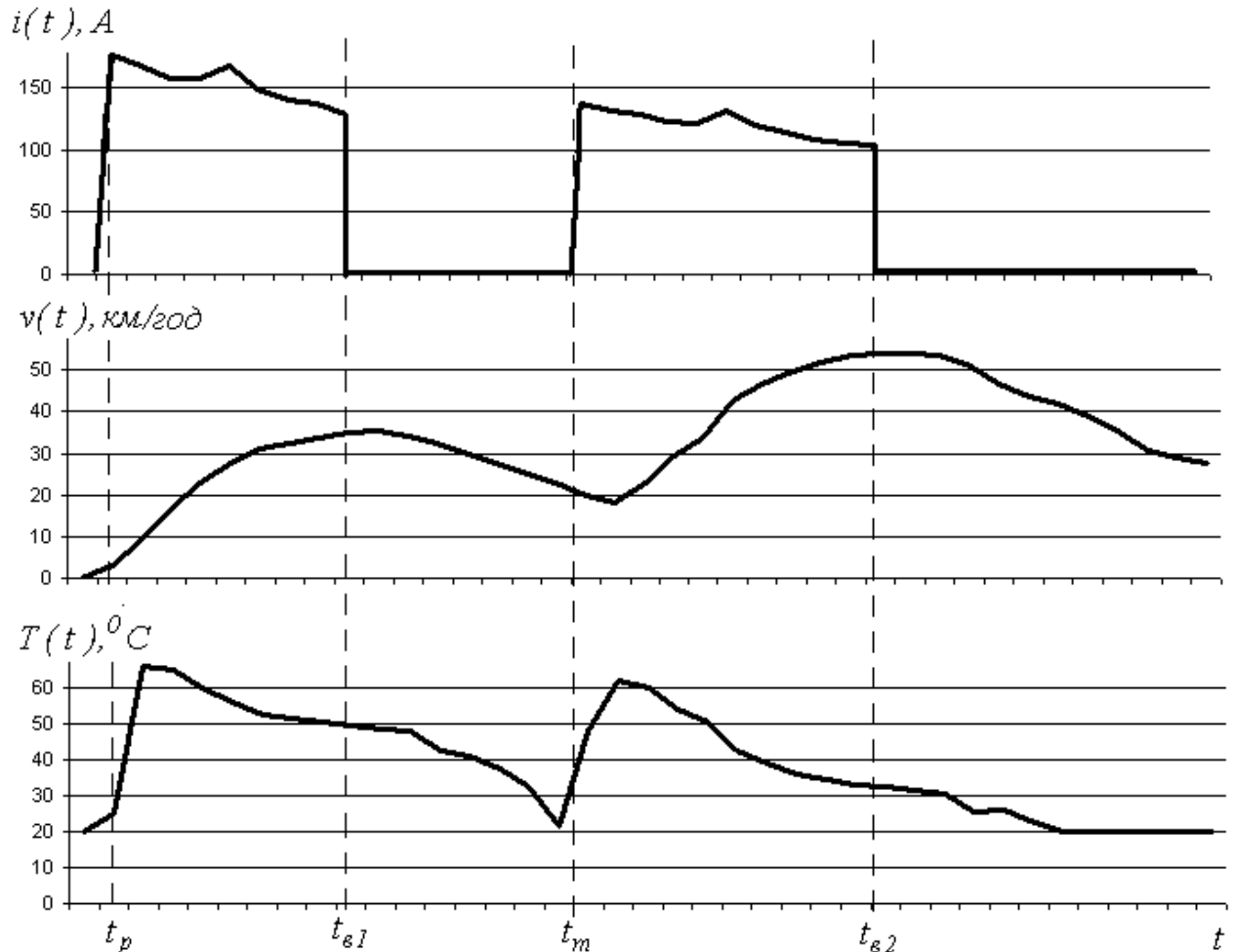
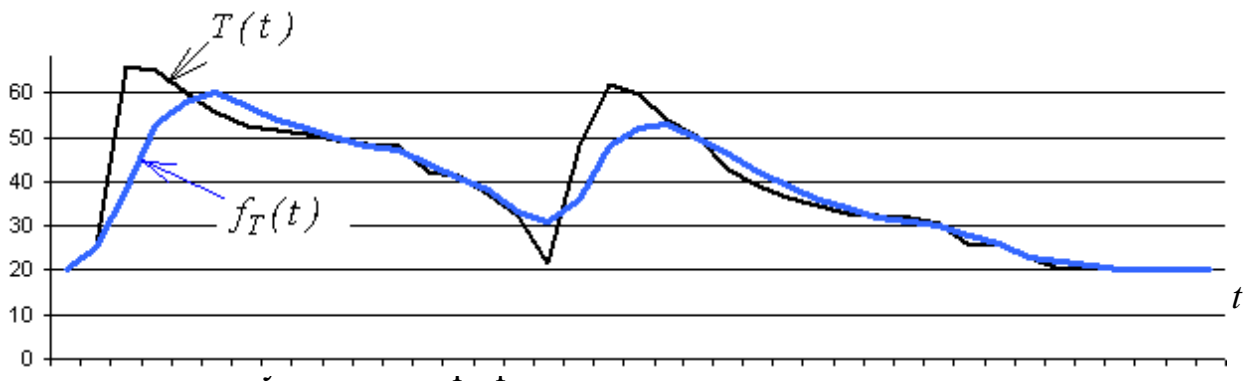


Рисунок 4.8 – Результати функціонування поточної моделі

Припустимо, що значення $T(t)$ не збігаються з отриманими від датчика, тобто $f_T(t)$ (4.2), як це наведено на рисунку 4.9.



В цьому випадку, відповідно до (4.1), починає функціонувати модель попередніх станів $f_T(t)$. За період часу Δt вибувають значення датчиків $T(t)$, і формується навчальна послідовність розмірністю N . Після чого виконується донавчання мережі NARX відповідно до виразів (4.6) – (4.10). Відміною цього процесу від початкового є те, що ваговим коефіцієнтам не присвоюються випадкові значення. Після донавчання відкориговані вагові коефіцієнти та параметри нахилу функцій активації нейронів змінюються в актуальній поточній моделі $f_T(t)$. Результат функціонування моделі з урахуванням наведеного поданий на рисунку 4.10.

З графіка зміни вихідних даних моделі $f_T(t)$ (див. рисунок 4.10) випливає, що після донавчання крива $f_T(t)$ точніше відтворює температуру ТЕД, отриману за показаннями датчиків.

Функціонування прогнозної моделі (4.1) виконується за ініціативою АСК МВРС для оцінки варіантів формування сигналів керування з урахуванням температурного режиму роботи ТЕД. Нейронна мережа NARX, яка входить до складу моделі , повинна відповідати НМ поточної моделі на дійсний час.



Автоматична система передає моделі “план розвитку подій” у вигляді значень струму та швидкостей руху за прогнозований проміжок часу

. Моделлю розраховуються значення

температури за вказаний час.

Розглянемо функціонування прогнозної моделі на прикладі. Так, якщо АСК МВРС потрібно збільшити швидкість руху з 30 км/год (див. рисунок 4.9) до 80 км/год, то можливі різні варіанти. Розглянемо два: перший (рисунок 4.11, а) – відносно короткотривалий режим тяги зі значним струмом (200 А), другий (рисунок 4.11, б) – два більш тривалих включення тяги з меншим

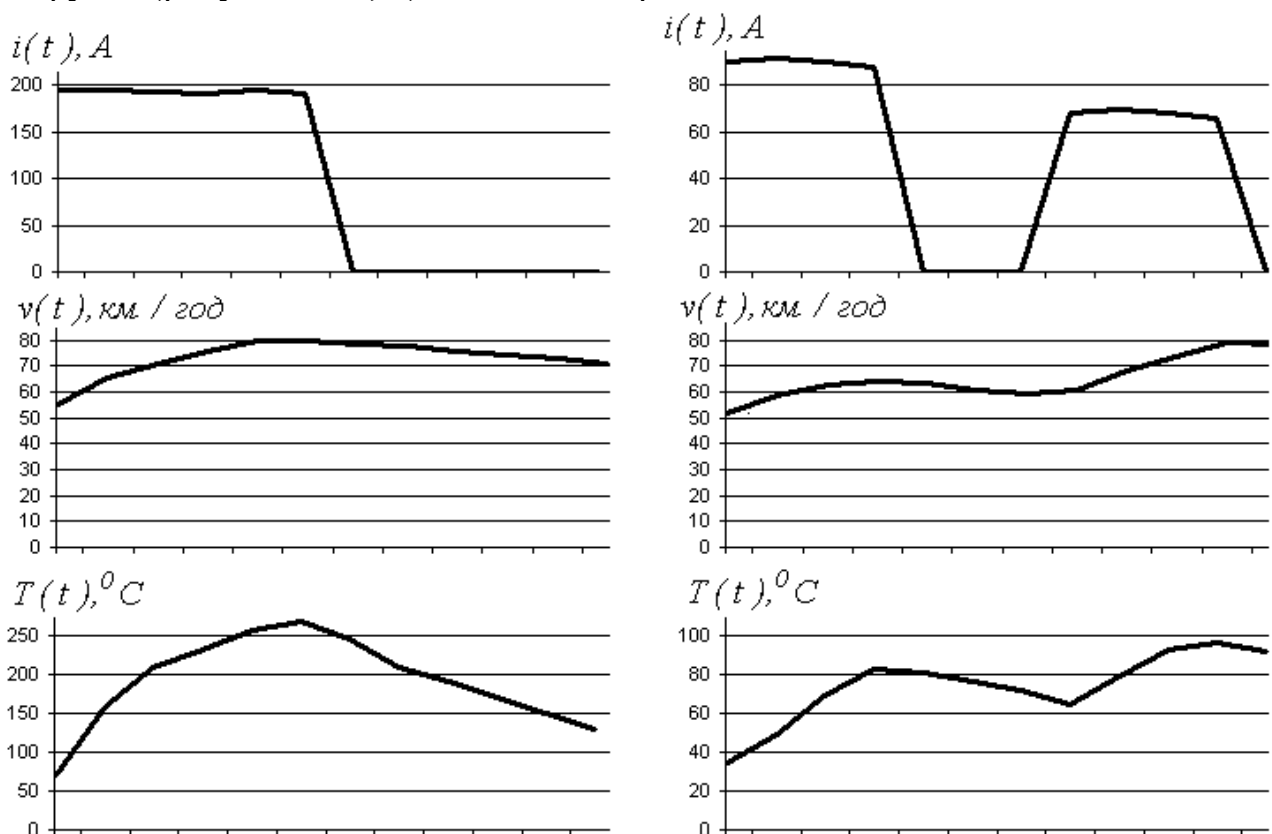




Рисунок 4.11 – Результати функціонування прогнозової моделі для двох варіантів режимів руху

4.3 Розробка нейромережної моделі контролю боксування колісних пар

Ефективність системи автоматичного керування МВРС безпосередньо залежить від спроможності автоматизованої системи керування (АСК) до адекватної оцінки впливу факторів, які діють на МВРС в процесі руху. Зокрема, при регулюванні струму ТЕП необхідно враховувати множину чинників, до яких належать: потрібне прискорення МВРС при рушанні з місця або гальмуванні, відсутність перевищення тягового струму в порівнянні з номінальним, синхронність роботи ТЕД моторного вагона, відсутність боксування, юзу, неприпустимого перегріву ТЕП тощо [253-255].

Слід зазначити, що в більшості МВРС, які знаходяться в експлуатації, застосовуються компоненти контролю та регулювання струму ТЕП застарілих типів, використання яких тепер недоцільно за техніко-економічними показниками [253-255]. З урахуванням цього, при розробленні і модернізації АСК МВРС потрібно орієнтуватися на застосування сучасних силових електронних компонентів та мікропроцесорних засобів обробки інформації й формування сигналів керування [361]. У зв'язку з цим постає питання синтезу відповідних функціональних моделей, в першу чергу орієнтованих на інтерпретацію даних, які відображають режими роботи ТЕП.

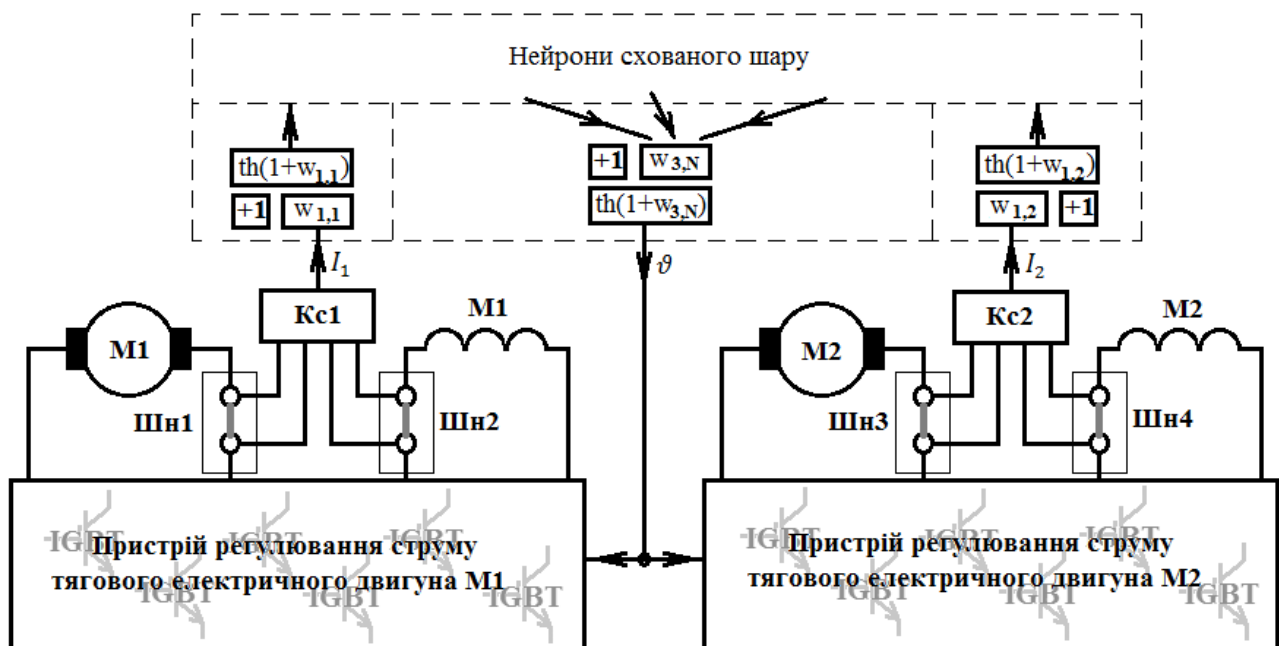
Так, в [361] виконано моделювання пускових характеристик тягових електричних двигунів МВРС з урахуванням їх власних особливостей. При цьому розглянуто функціонування окремого ТЕП без урахування можливості одночасного керування двома двигунами у візку, чотирма – у моторному вагоні, рухомим складом в цілому. Відокремивши одну із значущих складових розробки АСК МВРС, сформулюємо задачу - розробити модель контролю юзу або боксування колісних пар у візку моторного вагона МВРС.

Практичною рекомендацією, яка випливає з результатів моделювання пускових характеристик ТЕП, є застосування IGBT-транзисторів для регулювання струму тягового двигуна. Якщо розглядати два ТЕП у візку моторного вагона, то потрібно враховувати їх синхронну роботу за поточними значеннями відповідних тягових струмів (I_1, I_2). У разі виникнення різниці, яка перевищує певний припустимий поріг, необхідно формувати сигнал ϑ для прийняття регулюючого рішення.

В найпростішому вигляді: $\vartheta = I_1 - I_2$, але навіть в ідеальному випадку, при абсолютно ідентичних характеристиках ТЕП значення ϑ в процесі функціонування не буде дорівнювати нулю.

Зазначимо, що в МВРС, які знаходяться в експлуатації, поріг спрацювання схеми захисту від боксовання або юзу (ϑ_{max}) встановлюється апріорно за значенням міжколекторної напруги двох ТЕП, які включені за мостовою схемою, завдяки застосуванню реле боксовання [254-256]. 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 АСК МВРС доцільно застосовувати більш гнучкий математичний апарат моделювання, який спроможний адаптуватися до конкретних умов функціонування – методи та засоби теорії нейронних мереж (НМ) [341]. При цьому доцільно орієнтуватися на динамічну нейромережну модель елемента, наведену в [303, 344, 350, 351], в структуру якої слід ввести два входи.

Розглянемо структуру нейромережної моделі оцінки різниці тягових струмів (НМ ОРТС) та її функціонування у складі пристрою керування двома ТЕП у візку (рисунок 4.12).



та надходить до пристроїв комутації Kc1 та Kc2, які формують значення I_1, I_2 в залежності від поточного режиму роботи двигунів. Останні надходять до відповідних входів першого шару НМ ОРТС. Моделлю виконується обробка інформації та формується вихідний сигнал ϑ , який подається до пристроїв регулювання струму ТЕП.

Для розроблення моделі ОРТС введемо умови її функціонування та обмеження. При цьому розглядаємо 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 нейромережної моделі у разі виникнення потреби.

З урахуванням необхідного діапазону вихідних значень $[-1, 1]$, в НМ ОРТС обираємо функцію збудження нейронів – гіперболічний тангенс [301, 303, 344, 353, 388]:

$$y_i = th(v_j), \quad (4.10)$$

де v_j – індуковане локальне поле нейрона (вагова сума всіх синаптичних входів та порогових значень);

– вихід j -го нейрона.

З урахуванням схованих шарів модель функціонування при прямому розповсюдженні сигналів набуває такого вигляду [303, 344]:

$$, \quad (4.11)$$

де w_{ij} – відповідний ваговий коефіцієнт;

– кількість нейронів у j -му шарі (для першого шару

).

Для навчання використовуємо процедуру зворотного розповсюдження помилки. Корегування вагових коефіцієнтів шару j нейронної мережі виконується відповідно до загального дельта-правила [303, 344, 353]:

$$, \quad (4.12)$$

де η – параметр швидкості навчання;

– постійна моменту.

Сформуємо первинну навчальну послідовність, вважаючи, що обидва ТЕП мають однакові характеристики (ідеальний випадок). До послідовності включаємо тільки окремі значення, розраховуючи, що завдяки своїм властивостям, нейронна мережа автоматично побудує поверхню, яка розмежує всі можливі вхідні значення на два вихідних: «1» – струми рівні; «0» – струми різняться. Тоді, обмежуючи максимальний струм двигуна

значення 300 А, зведемо навчальні приклади до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Первинна навчальна послідовність НМ ОРТС

I_1	I_2	ϑ
300	300	0,5
240	240	0,5
150	150	0,5
50	50	0,5
0	0	0,5
5	0	1
0	5	0
-	-	-

В процесі навчання отримано задовільне значення середньоквадратичної похибки: 10^{-8} . Діапазон можливих вихідних значень моделі при зміні вхідних від нуля до максимального наведено на рисунку 4.13 у вигляді поверхні. При цьому, якщо різниця між струмами $I_1 I_2$ перевищує 5 А, та $I_1 > I_2$, то $\vartheta \approx 0$. Якщо $I_1 < I_2$, то $\vartheta \approx 1$, тобто після первинного навчання нейромережна модель реалізує функцію

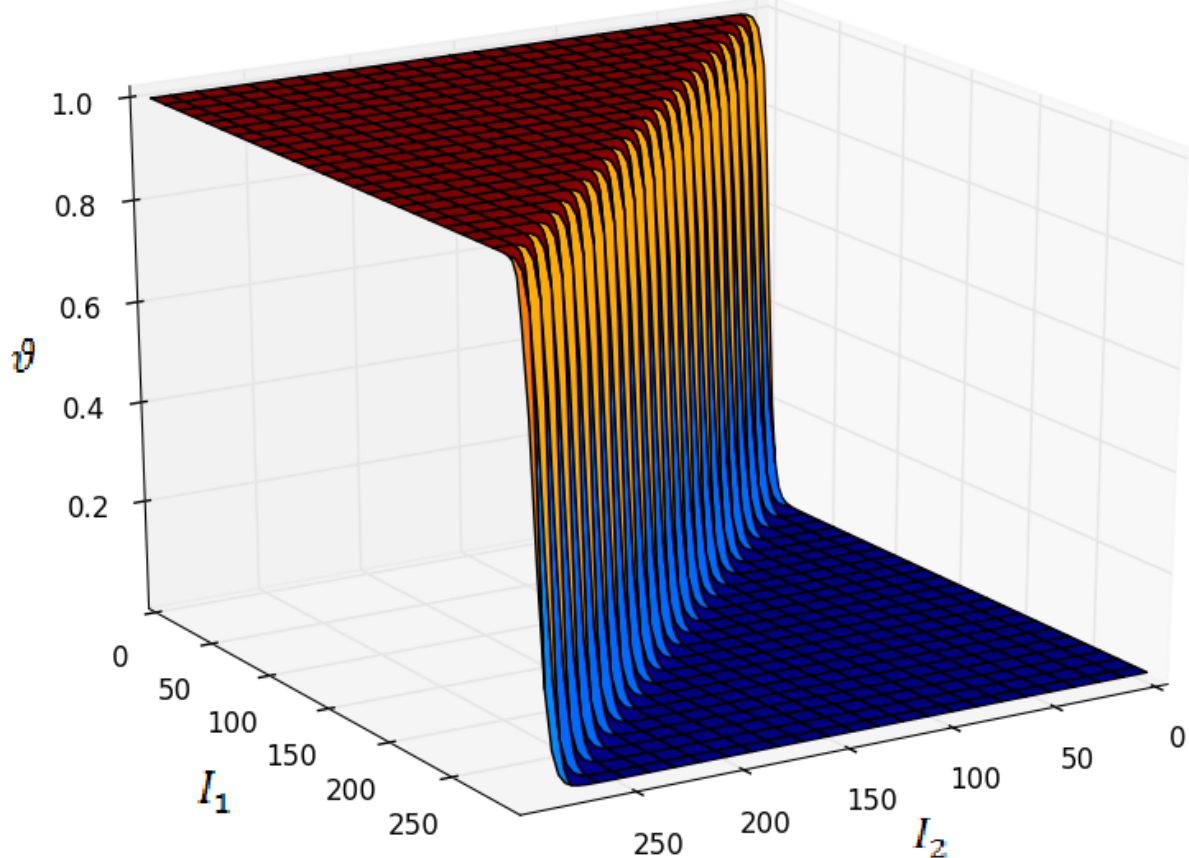
$$\vartheta \approx \begin{cases} 0, & \text{якщо } I_1 > I_2 \\ 0,5, & \text{якщо } I_1 \approx I_2 \\ 1, & \text{якщо } I_1 < I_2 \end{cases} \quad (4.13)$$

Рисунок 4.13 – Поверхня вихідних значень моделі НМ ОРТС після первинного навчання

З урахуванням неідентичності тягових характеристик двох ТЕП у візку в процесі руху МВРС, при відсутності боксування або юзу, буде спостерігатися відхилення значення ϑ від нуля. Причому при різних струмах знак ϑ може також змінюватись. Для врахування особливостей ТЕП потрібно донавчати нейромережну модель в процесі руху ОРТС, але це повинно відбуватися тільки у разі синхронного обертання колісних пар візка. Останнє фіксується датчиками кута обертання, які встановлюються на ротор ТЕП.

Припустимо, що в процесі початку руху МВРС виявилось, що при відсутності боксування або юзу струми двох ТЕП I_1, I_2 набували значень, наведених в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Робоча послідовність для донавчання НМ ОРТС

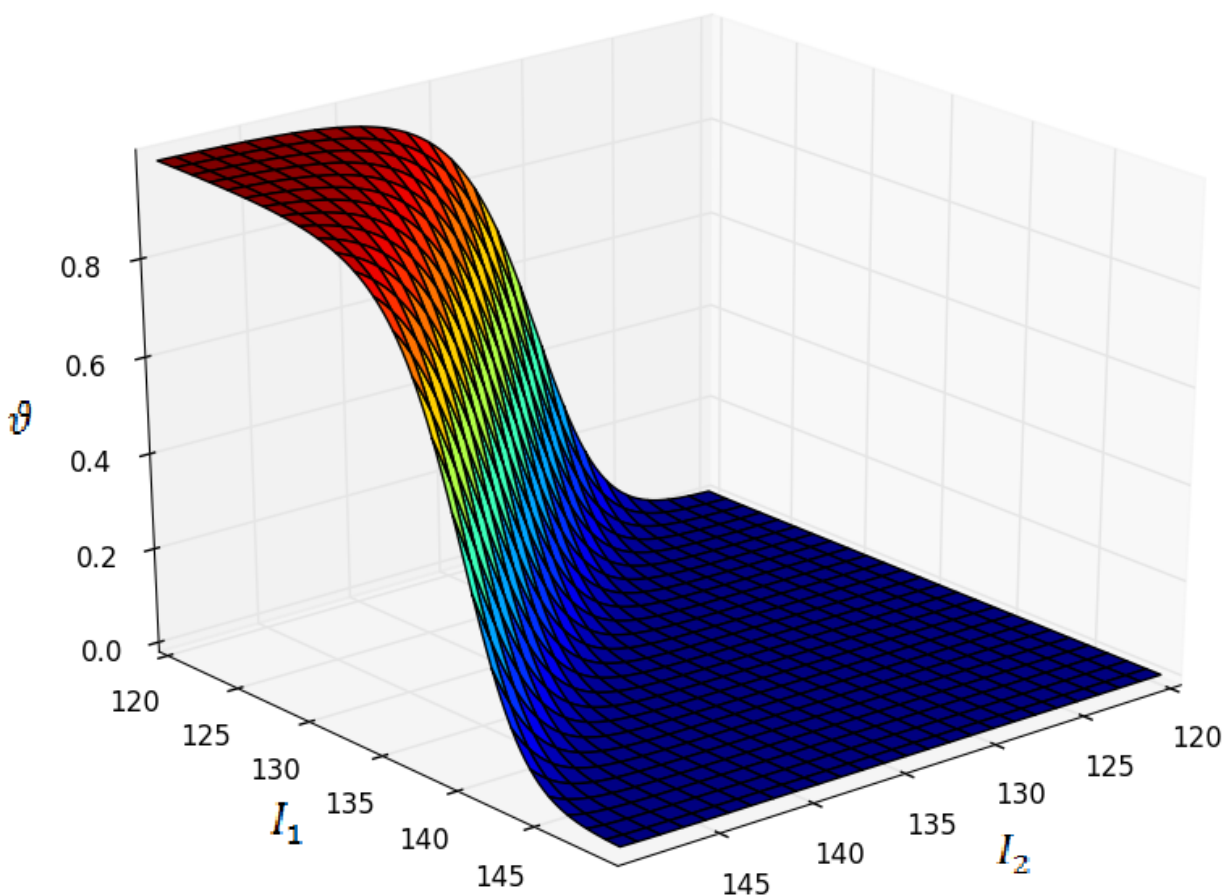


I_1	I_2	ϑ
130	138	0,5
142	146	0,5
127	131	0,5
135	143	0,5
137	143	0,5

-	-	-
---	---	---

Тоді, якщо проведено тільки первинне навчання моделі НМ ОРТС, то для всіх наведених випадків значення виходу дорівнювало б одиниці, тобто моделлю був би зафіксований факт боксування або юзу. Але після проведеного донавчання НМ ОРТС модель спроможна враховувати відхилення, яке склалось в процесі руху МВРС. Поверхню вихідних значень моделі НМ ОРТС при струмах ТЕП 120...150 А наведено на рисунку 4.14.

З рисунка видно (див. рисунок 4.14), що після донавчання моделлю не втрачена здатність до розпізнавання ситуації, коли струми ТЕП у візку значно відрізняються.



1 На основі динамічної нейронної мережі типу NARX з модифікованим алгоритмом навчання за методом зворотного поширення похибки розроблені нейромережні моделі теплових режимів функціонування ТЕД, які враховують попередній стан ТЕД та функціонують у реальному часі. Розроблені моделі дозволяють забезпечувати як поточне функціонування, так і виконувати прогноз за параметром температури ТЕД. Для підтримки актуальності та мінімізації похибки моделювання застосовується метод донавчання нейронної мережі за вимірюваними даними в процесі функціонування без вчителя.

2. Моделювання з використанням теплової моделі двигуна дозволило отримати параметри зміни вхідних сигналів від часу (t) при розгоні поїзда, сигнал активної потужності P і швидкості повітряного потоку обдування двигуна v . При цьому встановлено, що можливі різні варіанти збільшення швидкості руху МВРС, а саме: перший - відносно короткотривалий режим тяги зі значним струмом (200 А); другий - два більш тривалих увімкнення тяги з меншим струмом (90 та 70 А, в режимі зменшення магнітного потоку в обмотках збудження) та проміжним вибігом. Слід зазначити, що перший варіант дозволяє збільшити швидкість руху за мінімальний проміжок часу, але при цьому значення температури двигунів набуде неприпустимого рівня. Другий варіант найбільш вдалий з точки зору забезпечення температурного режиму ТЕД.

3. Розроблено нейромережну модель контролю боксування колісних пар. За результатами моделювання та оцінки отриманих даних зроблено висновок про те, що в роботі знайшли подальший розвиток положення теорії автоматичного керування МРС в частині розроблення моделі контролю юзу або боксування колісних пар у візку моторного вагона МРС, що дозволяє підвищити ефективність процесу регулювання тягового струму на основі застосування сучасних електронних компонентів. В процесі навчання моделі отримано значення середньоквадратичної похибки: 10^{-8} . При цьому, якщо різниця між струмами $I_1 I_2$ перевищує 5 А та $I_1 > I_2$, то $\vartheta \approx 0$. Якщо $I_1 < I_2$, то $\vartheta \approx 1$.

РОЗДІЛ 5

РОЗВИТОК МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ З УРАХУВАННЯМ ОБМЕЖЕНЬ ЩОДО КОМУТАЦІЇ, ТЕМПЕРАТУРИ ДВИГУНА Й БОКСОВАННЯ

5.1 Визначення таксономічного показника контролю стану тягового привода електропоїзда

При експлуатації електропоїздів залежно від зовнішніх умов і стану електропривода можуть суттєво змінюватися режими роботи ТЕД. У випадку зношування щітково-колекторного вузла, при великих навантаженнях, комутація може досягти граничноприпустимих значень. На тепловий режим роботи тягового двигуна впливають температура навколишнього середовища, інтенсивність обдування й тривала робота із граничними навантаженнями. Процеси боксування виникають при погіршенні умов зчеплення колісної пари з рейками й нерівномірному навантаженні ТЕД.

Оперативна оцінка цих процесів і наступне коректування режимів роботи електропривода, навіть при наявності відповідної інформації, вимагають часу для їхньої обробки й високої кваліфікації машиніста, що не завжди можливо в умовах руху МВРС.

Щоб уникнути виходу з ладу ТЕД і збереження працездатності тягового електропривода у випадках перевищення припустимих значень щодо комутації, температури й боксовання, запропоновано ввести в систему обмеження по керуваннях.

Із цією метою, для контролю стану тягового електропривода МВРС й обмеження пускового струму, у схему керування моторних вагонів уведено додаткові обладнання, функціонування яких побудовано на використанні сучасного підходу, заснованого на аналізі таксономічного показника. Як зазначалося в [127, 342, 345, 346, 349], цей показник є інтегральною величиною, що враховує всі контрольовані параметри.

Для визначення таксономічного показника побудована матриця спостережень $X(t)$. Число контрольованих параметрів може бути три, як показано на рисунку 5.1, і більше при необхідності урахування додаткових факторів, що виявляють вплив на динамічні й енергетичні характеристики МВРС (наприклад, напруга в контактній мережі й ін.).

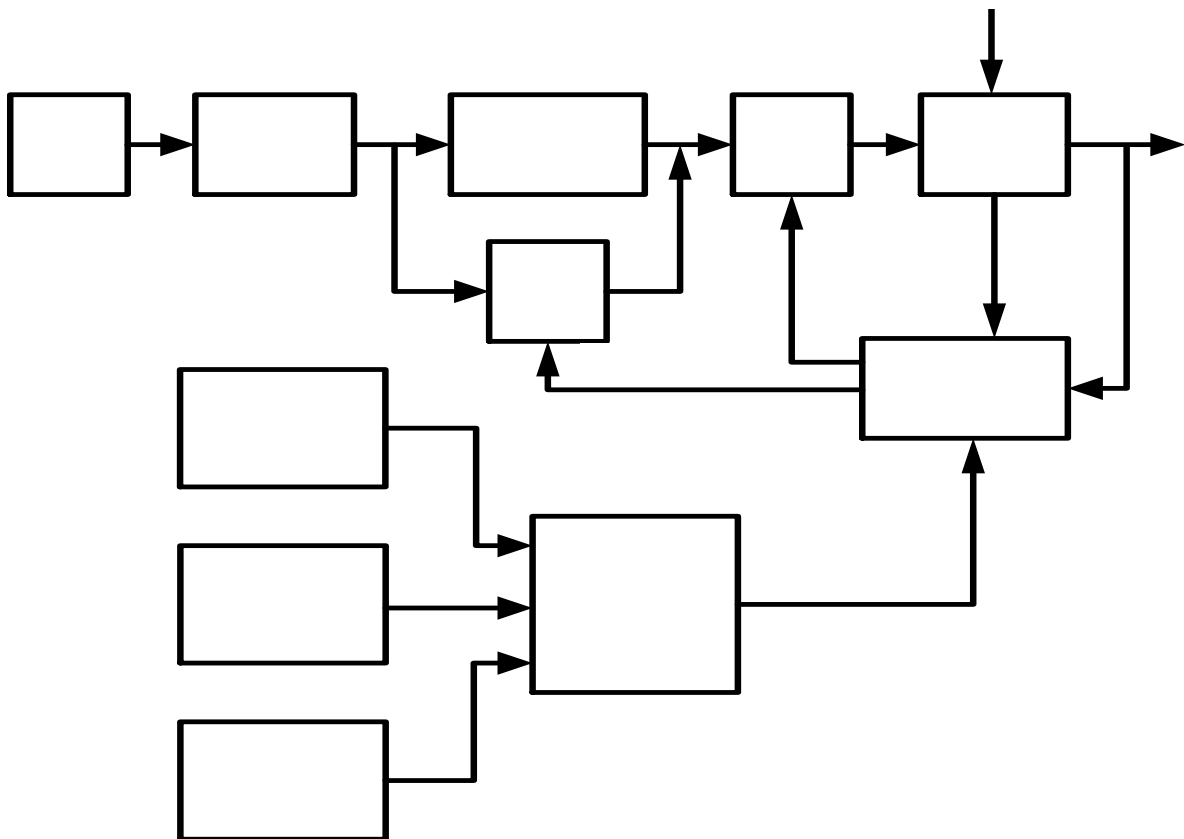


Рисунок 5.1 – Структурна схема МВРС з урахуванням обмежень щодо комутації, температури двигуна й боксовання

Обладнання контролю комутації, що входить до складу структурної схеми МВРС, за сигналами, які знімаються з датчиків струмів двигунів, визначає ступінь іскріння на колекторі двигуна. Контроль температури двигуна проводиться за потужністю двигуна й умовами його охолодження. Наявність

боксовання встановлюється за сигналами струмів ТЕД.

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.

Контрольовані параметри подаються у вигляді матриці спостережень $X(t)$ (5.1). Кожний зі стовпців матриці відповідає одному з вимірюваних параметрів x_1, \dots, x_n (для рисунка 5.1 їхня кількість дорівнює трьом). Число m рядків матриці відповідає числу тактів вимірів контрольованих показників [345-347, 349].

. (5.1)

Оскільки контрольовані параметри являють собою процеси різного характеру й можуть відрізнятися на порядки, матриця спостережень $X(t)$

перетвориться до стандартизованої:

, для чого для кожного показника розраховуються математичні сподівання й дисперсії μ_i й σ_i^2 визначаються відповідні елементи матриці :

5.2)

Для випадку нормальної роботи системи складається еталонна матриця спостережень X_{std} , з якою порівнюється стандартизована матриця поточних значень контрольованих параметрів. Близькість матриць еталонної й стандартизованої визначається за допомогою відстані між еталонним і спостережуваним параметром об'єкта:

(5.3)

де d_j – відстань між спостережуваним і еталонним об'єктом у момент часу t_j (); \bar{d} – середня відстань між спостережуваним і еталонним об'єктами в інтервалі часу $[t_1, t_m]$.

Величина відстані дозволяє визначити таксономічний показник.

Використовуючи рекурентну формулу обчислення відстані, одержуємо можливість визначити цей параметр для поточного часу $t = t_{m+1}$:

(5.4)

Реалізація наведених співвідношень може бути виконана, наприклад за допомогою відомої рекурентної нейронної мережі RTRN [127, 341, 345 - 349], що наведена на рисунку 5.2.

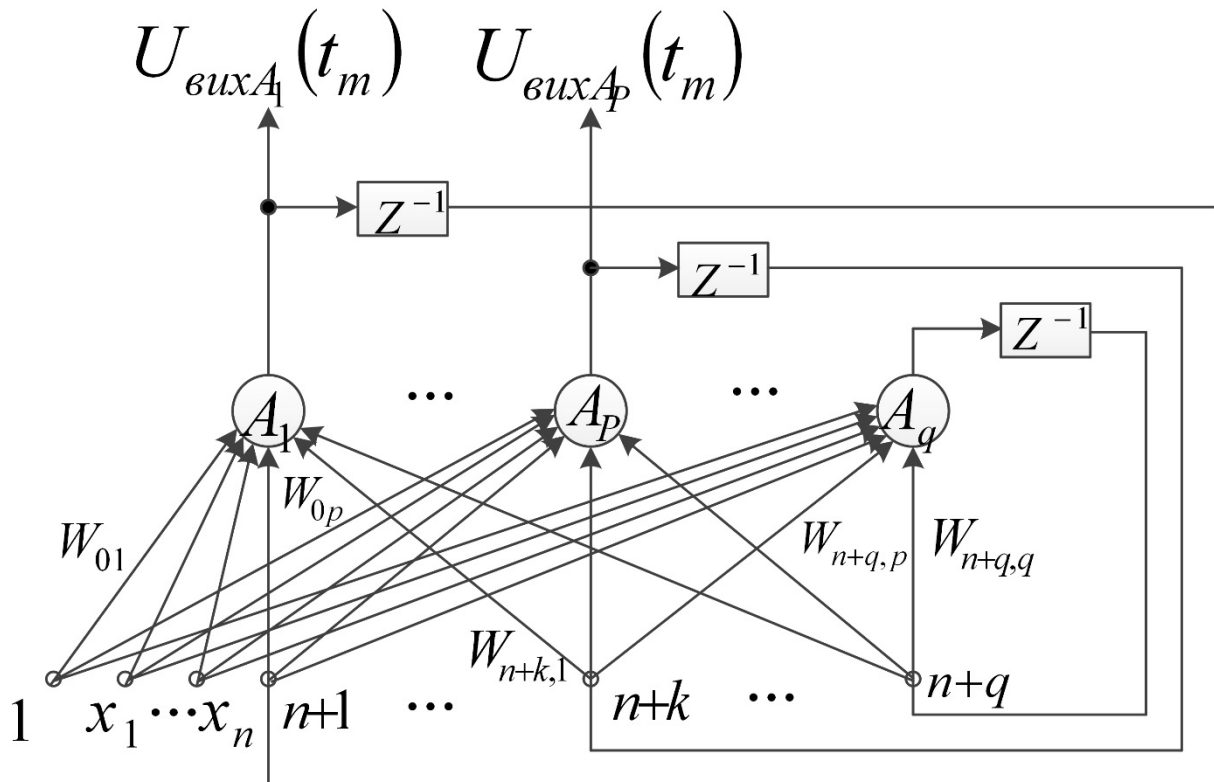


Рисунок 5.2 – Структура нейронної мережі RTRN

У нейронній мережі q нейронів A -шару, p з яких є її вихідними нейронами. На входи кожного A -нейрона надходить сигнал зсуву n вхідних сигналів нейронної мережі x_1, x_2, \dots, x_n і q сигналів з виходів A -нейронів

затриманих на один такт

часу лініями затримки. Таким чином, у деякий момент часу маємо такий вхідний вектор нейронної мережі RTRN:

. (5.5)

Вхідні й вихідні сигнали A -нейронів визначаються співвідношеннями

$$, \quad (5.6)$$

$$, \quad (5.7)$$

де x_i – власне вхідні і вихідні сигнали A -нейронів у момент часу t ;

$x_i(t)$ – вихідні сигнали нейронів, затримані на один такт часу;

w_{ij} – ваги зв'язків нейронної мережі;

f – неперервна функція активації нейронів мережі.

5.2 Розроблення методів керування тяговим електроприводом електропоїзда на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії

Оптимальне керування МВРС припускає вирішення завдання руху поїзда з мінімальними витратами енергії за умови дотриманням діючих обмежень на швидкість руху, прискорення й керування.

Поїзди метрополітену відрізняють висока динаміка й забезпечення комфортності перевезення пасажирів. Основна маса експлуатованих вагонів метрополітену (Е, ЕЖ, 81-717 і ін.) обладнана ТЕД постійного струму з послідовним збудженням [7, 11, 14, 15, 36, 49]. Регулювання частоти обертання ТЕД здійснюється зміною напруги на їхніх затискачах: перемикання з'єднання двигунів з послідовного на паралельне, включення додаткового резистора в коло якоря й ослаблення збудження за допомогою шунтування обмотки збудження. Ступеням ослаблення обмотки збудження відповідають ходові позиції, коли напруга на затискачах ТЕД не обмежується пускогальмовими резисторами.

Для регулювання опору в режимі пуску використовується груповий контролер. При послідовному з'єднанні ТЕД передбачено 16 пускових позицій реостатного контролера (РК), 17-та позиція відповідає автоматичній характеристиці повного збудження. Обертання вала РК на всіх ходових позиціях відбувається під контролем реле прискорення й гальмування (РПГ) за допомогою електродвигуна постійного струму. Швидкість обертання РК і його хронометричний хід регулюються змінними опорами в колі електродвигуна привода РК. РПГ, залежно від ступеня завантаження вагона,

підйому або спуску на перегоні, – настроюється на певний струм уставки. Так, при навантаженому вагоні або при русі на граничному підйомі, РПГ настроюється на максимальне пускове значення струму двигуна ($I_{\text{пуск.max}}$), для порожнього вагона або при русі на спуску, – на значення $\sim 0,8 I_{\text{пуск.max}}$. На рисунках 5.3 та 5.4 наведені пускогальмові діаграми вагонів метрополітену 81-717 і Е [354]. На діаграмах показані струми уставки РПГ залежно від завантаженості вагона. На перших семи позиціях (для порожнього вагона) і на перших десяти (для навантаженого вагона) відбувається хронометричне обертання РК із уповільненим переходом з позиції на позицію за час 0,2 с при ослабленому збудженні; а починаючи з 8-ї або з 11-ї позиції вал РК обертається під контролем РПГ з повним магнітним потоком. Уповільнене обертання РК на перших позиціях при ослабленому збудженні виконане для плавності пуску поїзда. Аналогічним чином виконане гальмування вагона.

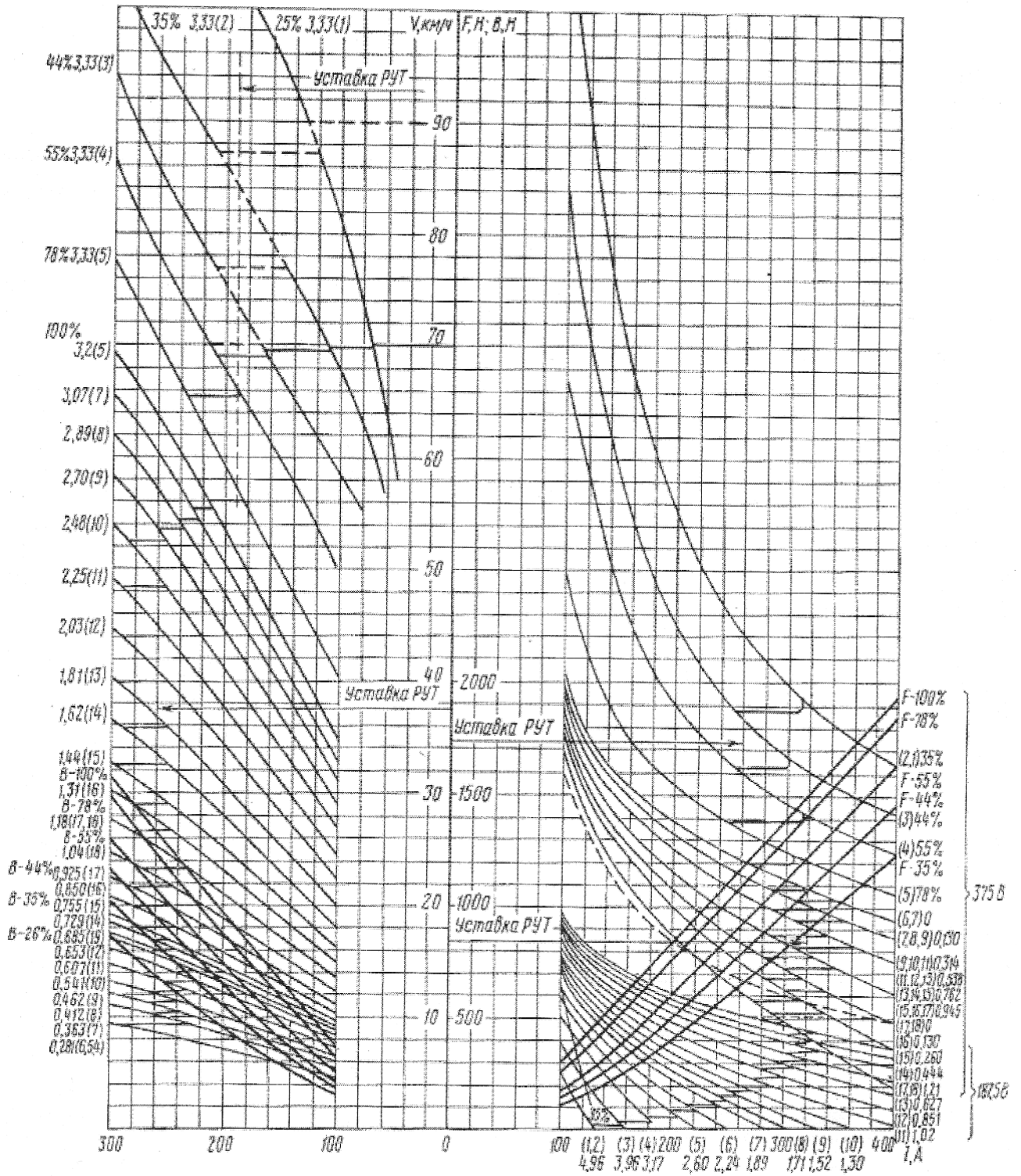


Рисунок 5.3 – Пускогальмова діаграма вагона 81-717

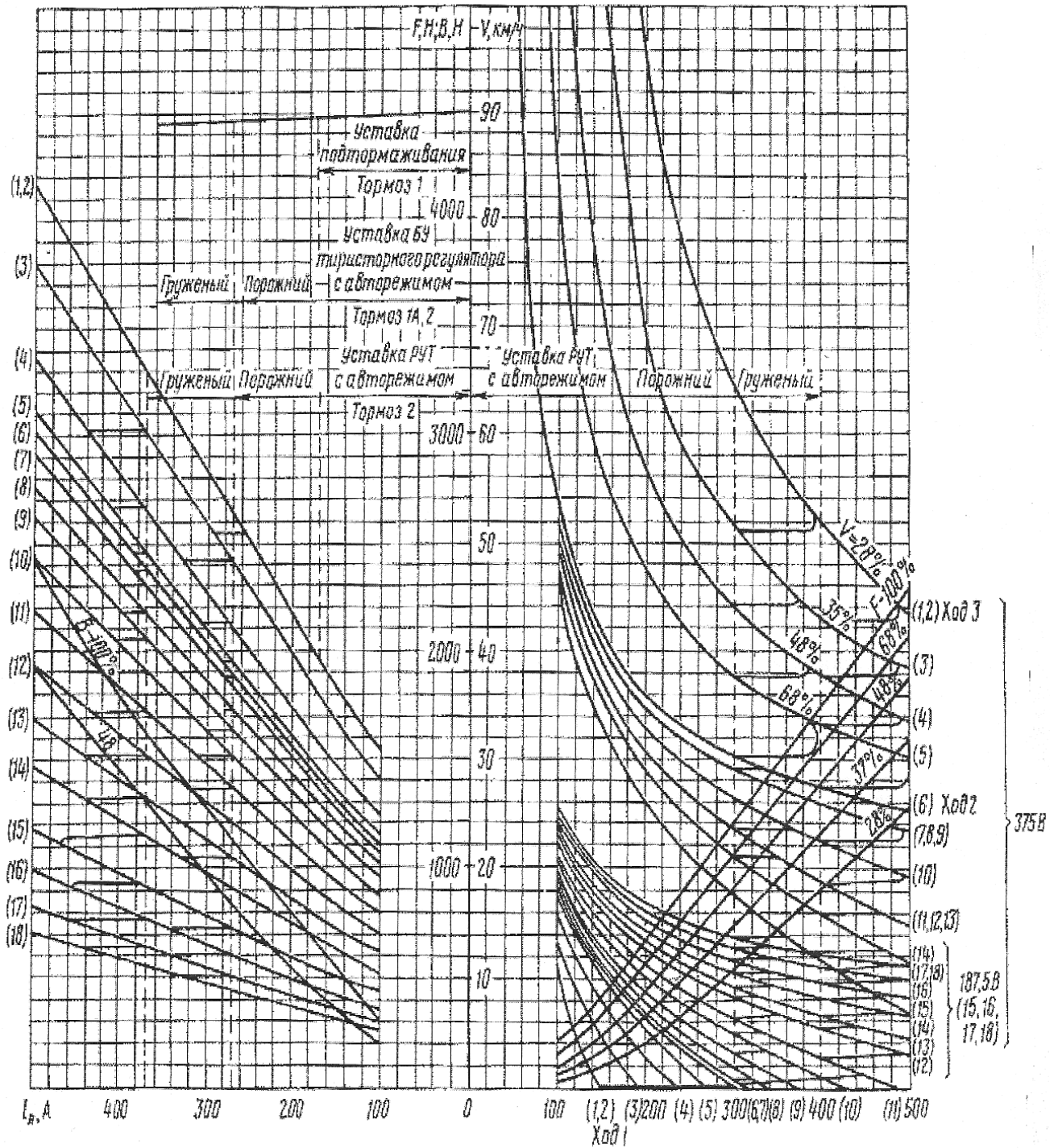


Рисунок 5.4 – Пускогальмова діаграма вагона Е

На рисунку 5.5 наведена типова діаграма процесу руху поїзда Харківського метрополітену по перегону між двома станціями.

Враховуючи досить швидкі процеси пуску й гальмування вагонів метрополітену й відносно невеликі відстані між станціями, становить практичний інтерес оптимізація руху поїзда по всій лінії за допомогою нейронних мереж адаптивної резонансної теорії.

Рисунок 5.5 – Типова діаграма процесу руху поїзда Харківського метрополітену

5.3 Реалізація асоціативної пам'яті системи керування на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії

Зберігання інформації в пам'яті комп'ютера може бути організовано шляхом використання асоціативної пам'яті на основі нейронних мереж. Оскільки при експлуатації електропоїздів метрополітену може з'явитися додаткова інформація (наприклад, пов'язана з появою нових станцій), то цю пам'ять необхідно виконувати на основі нейронних мереж, які можуть запам'ятовувати додаткову інформацію без викривлення вже наявної або повного перенавчання нейронної мережі.

До таких мереж належать відомі нейронні мережі адаптивної резонансної теорії [342, 347, 355, 356, 359, 389], зокрема дискретна нейронна мережа АРТ-1.

Нейронна мережа АРТ-1 (рис. 5.6) складається з трьох шарів нейронів: шар вхідних бінарних *S-нейронів*; шар інтерфейсних бінарних *Z-нейронів* і шар розпізнавальних *Y-нейронів*.

Керування нейронами *Z-* і *Y-шарів* здійснюється за допомогою керуючих нейронів G_1 , G_2 і розв'язувального нейрона R .

Одиничні сигнали активних *Z-* і *S-елементів* надходять на входи розв'язувального нейрона R , який розраховує параметр подібності між вхідним зображенням і зображенням, що зберігається у вагах зв'язків нейрона-переможця Y_j :

(5.8)

де p – параметр подібності зображень;

– норма зображення, що зберігається у вагах зв'язків нейрона-

переможця,

;

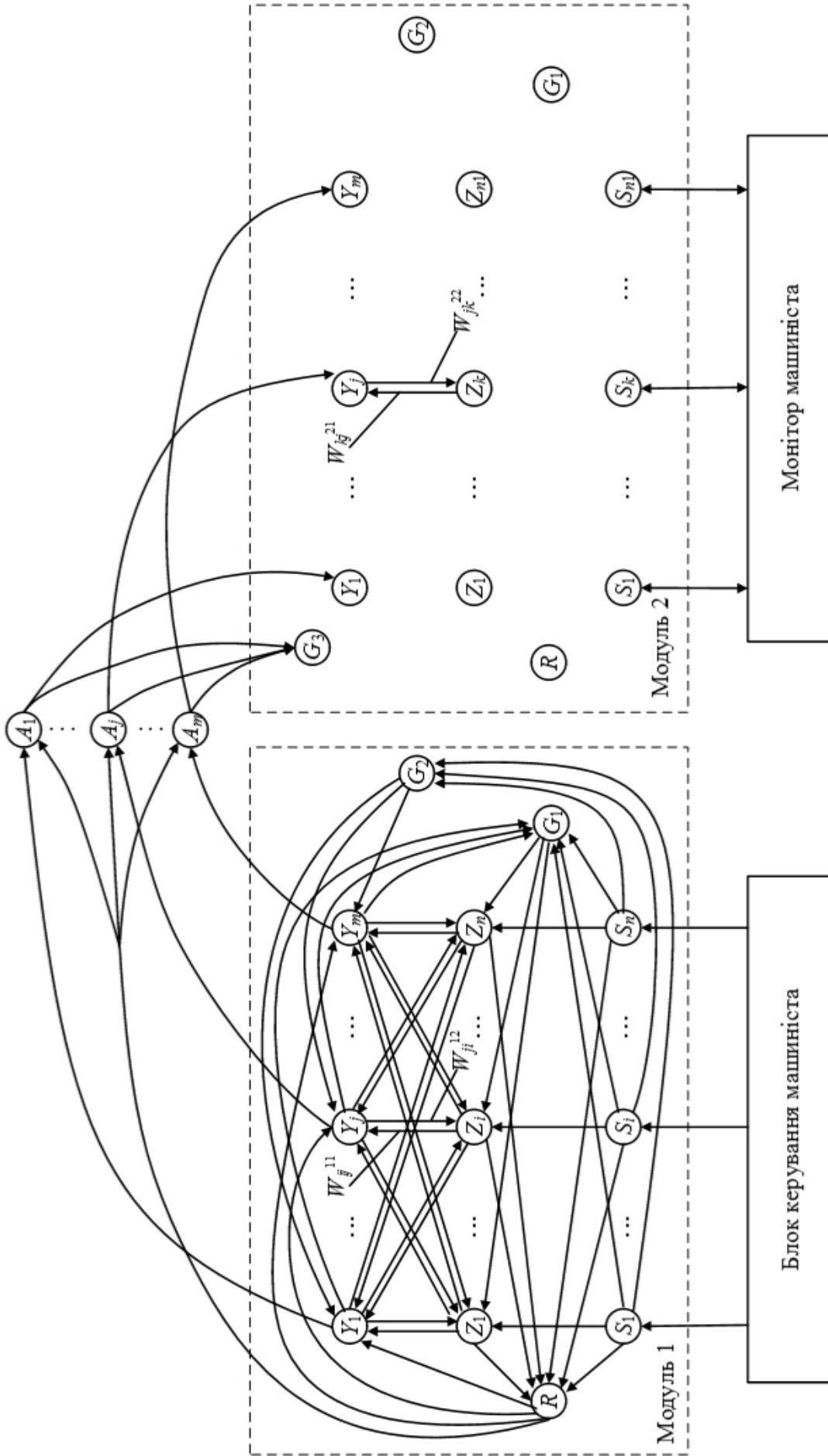
– норма вхідного зображення,

;

– вихідний сигнал нейрона Z_i .

На основі дискретної нейронної мережі АРТ-1 пропонується асоціативна пам'ять, зображена на рисунку 5.6, що складається із двох модулів, кожний з яких є нейронною мережею АРТ-1.

Рисунок
5.6 –
Реалізація
асоціати
вної пам'
яті
дискретн
ої
нейронн
ої
мережі
АРТ-1



Модуль М1 на основі параметрів поточного стану руху потяга (номер ділянки; ідентифікатор, m – маса, $v(x)$ – оцінка швидкості руху на відповідній ділянці, $t(x)$ – 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 состава 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.

Алгоритм навчання модулів асоціативної пам'яті

Алгоритм навчання модулів асоціативної пам'яті відрізняється від класичних алгоритмів [347,350-360] такими особливостями:

1. Алгоритми навчання й розпізнавання розділені. У режимі розпізнавання не відбувається донавчання нейронної мережі.
2. При навчанні модулів використовується параметр подібності, що дорівнює одиниці.
3. Розподілені Y -нейрони обох модулів не можуть у режимі навчання адаптувати свої ваги зв'язків.

В алгоритмах функціонування дискретних нейронних мереж АРТ-1 використовуються такі позначення:

$n, n1$ – число компонент у вхідних векторах відповідно до модулів 1 і 2 асоціативної пам'яті;

m – число розпізнавальних елементів у розпізнавальних шарах модулів 1 і 2;

$x, x1$ – відповідно n і $n1$ – вимірні вхідні вектори модулів 1 і 2 асоціативної пам'яті;

q_1, q_2 – число вхідних навчальних векторів відповідно до модулів 1 і 2;

$w, w1$ – ваги зв'язків від інтерфейсних нейронів

w_1, w_2 – ваги зв'язків між нейронами модулів 1 і 2 відповідно до елементів цих модулів;

, – ваги зв'язків від розпізнавальних нейронів
модулів 1 і 2 відповідно до інтерфейсних елементів
і ;
 p_1, p_2 – параметри подібності відповідно до модулів 1 і 2.

Алгоритм навчання модуля 1 асоціативної пам'яті

Крок 1. Ініціалізуються ваги зв'язків модуля 1 ,
, задається параметр подібності $p_1 = 1$;

задається безліч навчальних вхідних векторів

Структура навчальних вхідних векторів можлива така:

Код лінії метрополітену	Код станції	Код напрямку руху	Код часу руху по перегону	Код завантаженості состава
-------------------------	-------------	-------------------	---------------------------	----------------------------

Для Харківського метрополітену під код лінії можна виділити не більш двох-трьох розрядів, під код станції – 4 розряди, напрямок руху – один розряд, під код часу руху – 3 – 5 розрядів, під код завантаження состава – 2 розряди.

Таблиця 5.1

№ з/п	Код лінії	Код станції	Код напрямку руху	Код часу руху	Код завантаження состава	Позначення навчального вектора
1	011	0001	1	001	01	
2	011	0010	1	001	01	
3	011	0011	1	001	01	
4	011	0100	1	001	01	
5	011	0101	1	001	01	
6	011	0110	1	001	01	
7	011	0111	1 (у тунель)	001	01	
8	011	0111	1	001	10	

9	011	0110	1	001	10	
10	011	0101	1	001	10	
11	011	0100	1	001	10	
12	011	0011	1	001	10	
13	011	0010	1	001	10	
14	011	0001	1 (у тупик)	001	10	
...

Якщо для навчання першого модуля асоціативної пам'яті використовувати дані по "Салтівській" лінії метрополітену, то можна одержати навчальні вектори, частина з яких наведена в таблиці 5.1.

Якщо задатися чотирма видами завантаження состава (порожній, завантажений на 25 %, завантажений на 50 % і завантажений на 100 %), трьома часами руху состава (уповільнене, номінальне, прискорене) і двома можливими напрямками руху, то для "Салтівської" лінії метрополітену необхідно мати не менш 24 ($q_1 = 24$) навчальних векторів, кожен з яких має 13 компонент, тобто $n = 13$. Число розпізнавальних нейронів має бути не менше 24, тобто $m \geq 24$, візьмемо $m = 24$.

Ваги зв'язків
числом n [297,305,306]:

визначаються

Крок 2. Поки не виконуються умови припинення роботи алгоритму навчання першого модуля, для кожного навчального вектора

виконується циклічна обробка інформації за допомогою кроків 3 – 11 алгоритму.

Крок 3. Задається нульова активація всіх нейронів першого модуля асоціативної пам'яті:

Навчальним тринадцятирозрядним бінарним вектором

визначаються вхідні й вихідні сигнали *S-елементів* вхідного шару

За допомогою розв'язувального нейрона *R* визначається норма вхідного вектора:

Крок 4. Визначаються вхідні й вихідні сигнали керуючих нейронів G_1 , G_2 і нейронів інтерфейсного шару:

$$\begin{aligned} & ; \\ & ; \end{aligned} \quad (5.9)$$

;

Крок 5. Для всіх незагальмованих розпізнавальних нейронів розраховуються їхні вхідні й вихідні сигнали:

;

Крок 6. Починається пошук розпізнавального *Y-нейрона*, ваговий коефіцієнт якого відповідає вхідному зображенню із заданим параметром подібності p_1 першого модуля. Пошук виконується циклічно за допомогою кроків 7 – 9 алгоритму.

Крок 7. У розпізнавальному шарі елементів визначається *нейрон* Y_j , вихідний сигнал якого підпорядковується умові

Якщо цю умову задовольняє два або більше *Y-нейронів*, то вибирається нейрон з найменшим номером. У розглянутому прикладі, коли вектор подається першим, зазначену умову задовольняють усі *Y-нейрони*, тому $J = 1$.

Якщо виявляється, що , то пред'явлене зображення не можна класифікувати, оскільки за параметром подібності воно не відповідає жодному із зображень, що зберігаються у вагах зв'язків *Y-елементів*. Тому всі нейрони *Y-шару* загальмовані.

Крок 8. Визначаються сигнали на виходах елементів інтерфейсного шару за правилом "два із трьох":

і розраховується норма вектора :

У розглянутому прикладі

, тому

Крок 9. За допомогою параметра подібності визначається можливість навчання нейрона Y_j :

якщо , то навчання можливе, і воно здійснюється на наступному кроці алгоритму;

якщо , то зображення за параметром подібності не належать до одного класу, тому нейрон Y_j має бути загальмований , а алгоритм має продовжити свою роботу із кроку 7.

У розглянутому прикладі , тому навчання ваг зв'язків мережі можливе, і воно здійснюється на 10-му кроці

роботи алгоритму.

Крок 10. Навчання або адаптація вагових коефіцієнтів зв'язків нейрона YJ здійснюється за допомогою відомих співвідношень [297, 305, 306]:

У розглянутому прикладі маємо:

;

;

;

У розглянутому прикладі матриця W^1 ваг зв'язків від Z -нейронів до Y -нейронів буде мати такий вигляд.

Розміри матриці – 13x24.

Крок 11. Перевіряються умови зупинника процесу навчання нейронної мережі. Такими умовами можуть бути: сталість усіх ваг зв'язків нейронної мережі протягом епохи; виконання заданого числа епох навчання нейронної мережі і т.д. Якщо умови зупинника виконуються, то перехід до останнього кроку алгоритму. А якщо ні, то – перехід до кроку 2 алгоритму.

У розглянутому прикладі здійснюється перехід до кроку 2 алгоритму.

Крок 2. На вхід нейронної мережі подається другий навчальний вектор

Крок 3. Задається нульова активність усіх нейронів першого модуля асоціативної пам'яті. Навчальним вектором визначаються вхідні й вихідні сигнали *S-елементів* вхідного шару:

;

Визначається норма вхідного вектора:

Крок 4. За співвідношеннями (5.9) визначаються вхідні й вихідні сигнали керуючих нейронів G_1, G_2 і нейронів інтерфейсного шару. При вхідному векторі маємо:

;

.

Крок 5. Розраховуються вхідні й вихідні сигнали всіх Y -нейронів:

;

;

;

;

.

Крок 6–9. На першому етапі пошуку нейрона-переможця в Y -шарі маємо $J=1$, однак визначення параметра подібності

показує, що вектор, що зберігається у вагах зв'язків нейрона Y_1 , недостатньо схожий на вхідний вектор . Тому нейрон Y_1 має бути загальмований і

початий новий цикл пошуку нейрона-переможця в шарі розпізнавальних нейронів. Цей цикл починається кроком 6 і закінчується кроком 9. При цьому як нейрон-переможець виділяється нейрон Y_2 .

Крок 10. Адаптуються вагові коефіцієнти зв'язків нейрона Y_2 за допомогою співвідношення:

Для розглянутого нейрона Y_2 маємо:

;

;

;

Матриця W^1 ваг зв'язків від Z -нейронів до Y -нейронів буде мати вигляд:

Крок 11. Перевіряються умови зупинника. Оскільки використані не всі навчальні вхідні вектори, то здійснюється перехід до кроку 2 алгоритму, де починається навчання вектором . Оскільки при навчанні нейронної мережі використовується параметр подібності, що дорівнює одиниці, то перехід до останнього кроку алгоритму може бути здійснений після навчання мережі вхідним навчальним вектором .

Алгоритм навчання модуля 2 асоціативної пам'яті

Кожному коду, що надходить на вхід модуля 1 асоціативної пам'яті, має відповідати унікальна залежність , що описує рух состава по заданому перегону при заданому завантаженні й часі руху состава та зберігається в модулі 2 асоціативної пам'яті. На рисунку 5.7 наведений приклад навчального зображення для модуля 2.

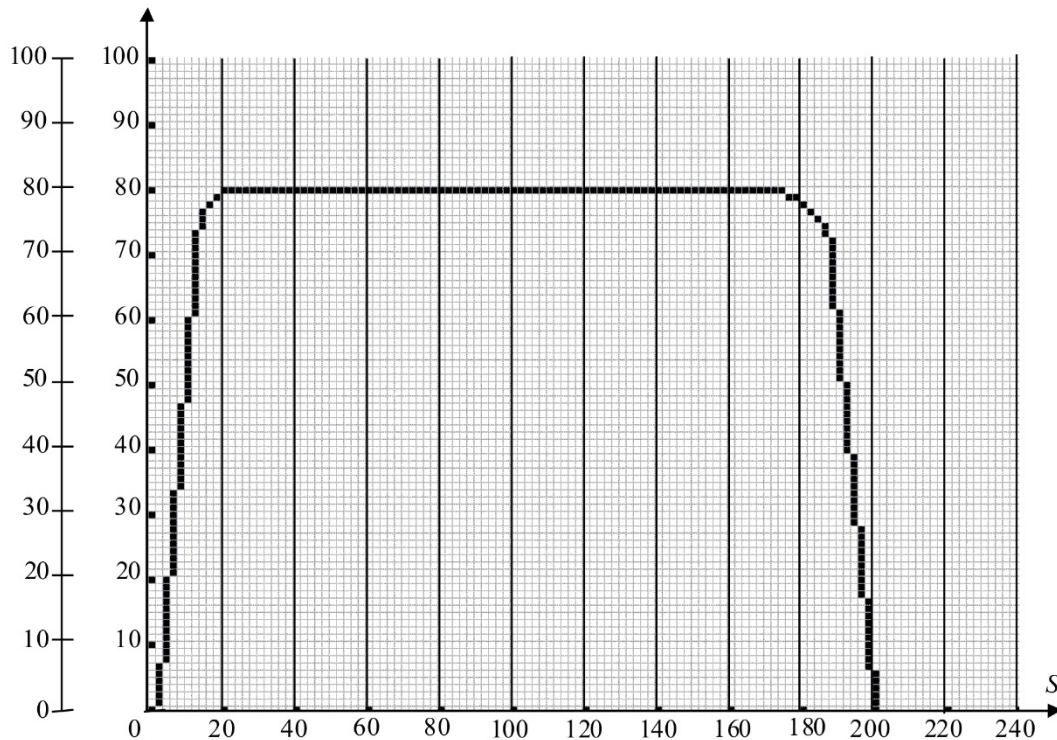


Рисунок 5.7 – Приклад навчального зображення для модуля 2

Незважаючи на те, що для навчання нейронної мережі має використовуватися послідовність зображень, кожне з яких містить $n_1 = 120 \times 100 = 12000$ пікселів, навчання другого модуля нейронної мережі виконується аналогічно навчанню першого модуля асоціативної пам'яті. При цьому навчальні зображення з функціями необхідно подавати таким чином, що розпізнавальні нейрони модуля 2 Y_1, Y_2, \dots, Y_m зберігали у своїх вагах зв'язків функції, відповідні до кодів навчальних векторів, що зберігаються в пам'яті нейронів Y_1, Y_2, \dots, Y_m першого модуля асоціативної пам'яті.

Алгоритм функціонування асоціативної пам'яті за підтримки рішень машиніста

Крок 1. При відправленні зі станції машиніст за допомогою блока керування задає нульову активацію всіх нейронів першого модуля й

керуючий вектор, що надходить на входи S -елементів першого модуля.

Крок 2. Визначаються вхідні й вихідні сигнали елементів вхідного шару:

;

.

Визначається норма вхідного вектора

.

Крок 3. Визначаються вхідні й вихідні сигнали керуючих нейронів G_1 , G_2 і Z -нейронів:

;

;

;

.

Крок 4. Розраховуються вхідні й вихідні сигнали розпізнавальних нейронів:

;

.

Крок 5. У розпізнавальному шарі нейронів визначається нейрон Y_L , вихідний сигнал якого підпорядковується умові

,

а вміст пам'яті нейрона за параметром подібності відповідає вхідному вектору S^v . У цьому випадку на виході нейронів Y_L і R з'являються одиничні вихідні сигнали:

Крок 6. Одиничні вихідні сигнали A_j надходять на вхід нейрона A_j , який визначає свій вихідний сигнал за допомогою співвідношення

Крок 7. Одиничний вихідний сигнал A_j переводить в активний стан керуючий нейрон G_3 ($A_j = 1$) і надходить на вхід нейрона Y_j модуля 2. Нейрон Y_j переходить в активний стан ($Y_j = 1$), оскільки на його входи надходять одиничні сигнали із двох джерел: з виходу нейронів A_j і G_3 .

Крок 8. Сигнали A_j і G_3 надходять на входи всіх Z -нейронів, вихідні сигнали яких визначаються співвідношеннями:

;

де $w_{YJ, Zk}$ – вага зв'язку від нейрона YJ до нейрона Zk , $w_{YJ, Zk} \in \{0, 1\}$. Вага зв'язку $w_{YJ, Zk}$ ($w_{YJ, Zk} \in \{0, 1\}$) може дорівнювати тільки 0 або 1.

Крок 9. Розраховуються вхідні й вихідні сигнали нейронів S -шару:

;

Крок 10. Вихідні сигнали нейронів *S-шару* подаються на вхід обладнання візуалізації для відображення заданої траєкторії руху состава по заданому перегону.

Крок 11. Зупинка.

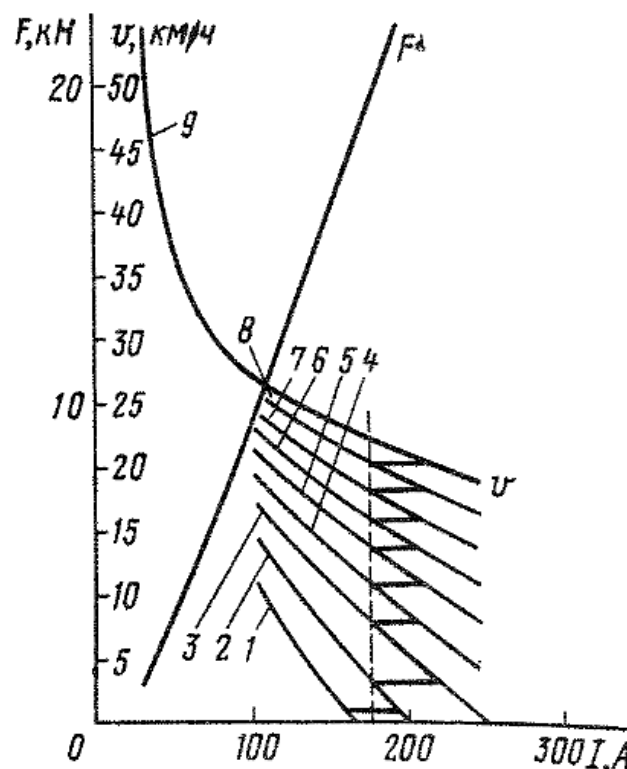
5.4 Моделювання пускових характеристик тягових електродвигунів із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є

Автоматична система автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом моторвагонних поїздів має включати в себе пристрій регулювання струму (ПРС) ТЕД. З урахуванням безпосереднього механічного зв'язку вала ТЕД з колесом вагона через редуктор та пружну муфту, від створюваного двигуном електромагнітного моменту напряму залежать характеристики руху МВРС [87, 244, 273]. У свою чергу, значення обумовлюється струмом ТЕД, тому розробленні методів та засобів його регулювання приділяється значна увага [361].

Найбільш поширеними засобами регулювання тягового струму є різновиди дискретного методу, зокрема – реостатного [256-259]. При цьому на етапі проектування визначається оптимальний пусковий струм ТЕД за множиною критеріїв, зокрема відсутності боксування МВРС, припустимого перегріву, прискорення, струму тощо. Відповідно до цього методу, в процесі рушання з місця послідовно до тягового двигуна підключені реостати, які обмежують значення пускового струму. При подальшому нарощуванні швидкості тяговий струм зменшується. Цей факт фіксується датчиком – реле

прискорення, яке автоматично вимикає реостати. І безреостатну (прир

ї наведено в роботі [361]. Слід відзначити, що регулювання струму, наслідком якого є боксування МВРС та погіршення сучасному рухомому складу дискретного регулювання при широтно-імпульсному використанні цих засобів, які негативно впливають



оматично ЕД на пускового струму, як

ць до різких змін швидкості в різних вузлах цього недостатку в певних позиціях регулювання струму [257,384]. Але це регулювання струму є недостатком і СЦБ.

Рисунок 5.8 – Діаграма зміни пускового тягового струму

З іншого боку, тепер існують потужні транзистори (наприклад, IGBT [257]), які на відміну від ключових елементів – тиристорів, дають змогу виконувати аналогове регулювання тягового струму з мінімальною кількістю гармонічних складових.

Узагальнюючи викладене, слід зауважити, що застосування як дискретного, так і аналогового методів регулювання тягового струму ґрунтується на моделюванні характеристик ТЕД. При цьому в першому випадку здебільшого достатньо моделі, яка відтворює природну характеристику тягового двигуна. У другому – необхідно виконувати загальне моделювання, яке враховує характеристики ТЕД в різних реостатних режимах роботи, при цьому опір реостата повинен бути поданий аналоговою функцією часу.

Слід зауважити, що виконання останньої вимоги є досить нетривіальним завданням [87, 244, 352]. Аналіз методів його аналітичного вирішення виявило низку проблем, пов'язаних зі складністю розрахунків, потребою у вимірюванні індивідуальних параметрів ТЕД, які з кожним конкретним екземпляром дещо змінюються, необхідністю врахування деяких апріорно не визначених характеристик [120, 299].

У зв'язку з наведеним, одним з ключових питань розроблення автоматизованої системи автоматичного керування є моделювання пускових характеристик тягових електричних двигунів моторвагонного рухомого складу з урахуванням їх власних особливостей [256, 261, 352, 361 - 363].

На діаграмі зміни пускового тягового струму (див. рисунок 5.8) зображений початок руху МВРС з урахуванням переходу на наступні реостатні позиції. Наприкінці, коли швидкість руху досягає приблизно двадцяти кілометрів на годину, тяговий двигун починає функціонувати на природній (безреостатній) характеристиці. На діаграмі зображено її частину, яка реально реалізується.

Розглянемо фізично не відтворювану частину природної характеристики до перетину з віссю абсцис. Очевидно, значення цієї точки

обумовлене загальним активним опором ТЕД (обмоток якоря, головних та додаткових полюсів), яке наводиться в довідкових даних для конкретного типу двигуна [120, 256, 261, 361, 363], та діючим значенням постійної напруги. Наприклад, для тягового двигуна типу УРТ-110Б при напрузі 750 В, струм дорівнює 1800 А.

Розглядаючи природну характеристику ТЕД в часі, перейдемо до деякої функції . На цьому етапі дослідження приймемо, що для конкретні значення часу, за винятком нульового, не визначені. Тоді, з урахуванням довідкової інформації [361], та наведеного в роботі [256], для ТЕД УРТ-110Б при напрузі 750 В, набуває вигляду, наведеного на рисунку 5.9.

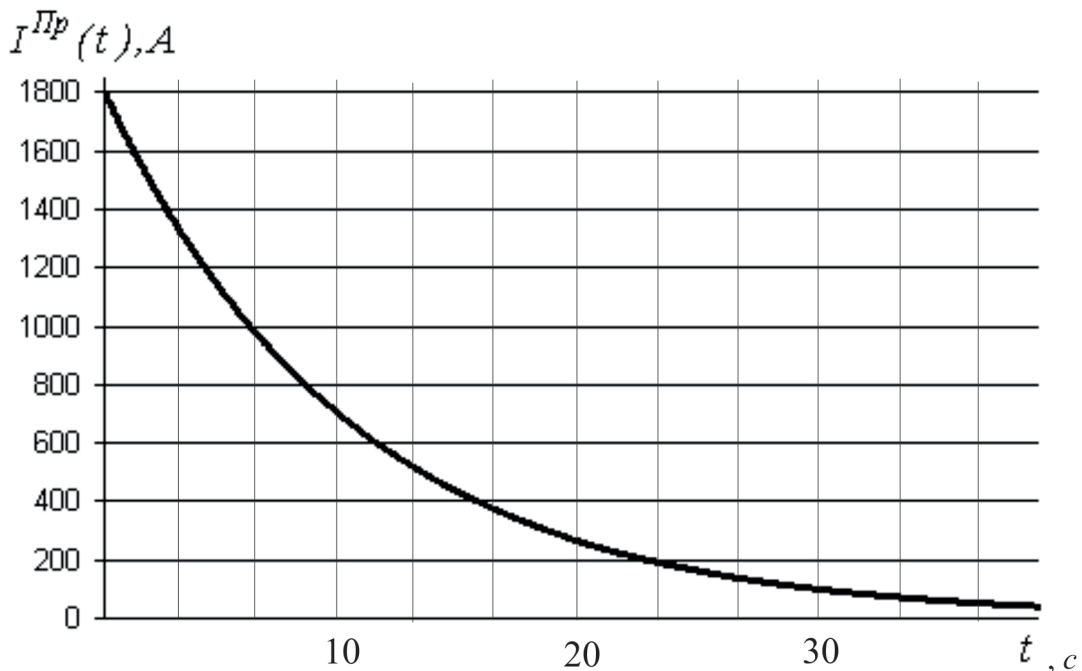


Рисунок 5.9 – Графік зміни пускового струму ТЕД УРТ-110Б в часі

З іншого боку, відповідно до положень класичної теорії автоматичного регулювання, щільнісна функція відклику зв'язує змінні входу та виходу системи таким чином [385]:

$$\cdot \quad (5.10)$$

Це рівняння отримуємо результатом застосування перетворення Фур'є до обох частин рівняння [385]:

$$\quad (5.11)$$

де $\delta(t)$ – 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 $i(t)$ є імпульсною характеристикою тягового електричного двигуна $I(\omega)$ з додаванням нульового значення, тобто

$$i(t) = I(\omega) \cdot e^{j\omega t} \quad (5.12)$$

Застосовуючи комплексне пряме перетворення Фур'є ($I(\omega)$), отримуємо

$$\quad (5.13)$$

де

– амплітуди спектральних складових;

– їх фаза;

, – реальна та уявна складові комплексного спектра відповідно.

На основі виразів (5.10) – (5.13), застосовуючи пряме перетворення Фур'є для переходу в частотну, та зворотне для переходу в часову області, отримуємо модель у вигляді виразу (5.14), яка зв'язує вхідний сигнал керування з вихідним. Причому останній чинник є функцією зміни струму ТЕД як результат реакції на

(5.14)

Аналітичний вираз (5.14) дає змогу виконувати теоретичні розрахунки в безперервному часі при однозначно визначених функціях

та. Але з причин, наведених у вступній частині роботи, це досить нетривіальна задача. З точки зору практичної доцільності, слід перейти до дискретного часу, де та до застосування дискретного перетворення Фур'є:

– прямого та зворотного відповідно. Вважаємо, що кінцеве значення часу та розрядність -перетворення збігаються і дорівнюють.

З урахуванням сформованих обмежень вираз (5.14) перетворюється до такого:

(5.15)

де – вхідний сигнал керування у вигляді вектора дискретних значень у моменти часу; – вектор вихідних значень струму ТЕД; – дискретна імпульсна характеристика.

Результатом прямого ω -перетворення є вектор комплексних значень розмірністю n , тоді

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{F} \mathbf{x}(t) \quad (5.16)$$

де у квадратних дужках – операція векторного множення елементів комплексних спектрів імпульсної характеристики та вхідного сигналу в частотній області. Результатом множення є вектор

розмірністю n . Тоді вираз (5.15) набуває вигляду

$$\mathbf{X}(\omega) = \mathbf{F} \mathbf{x}(t) \quad (5.17)$$

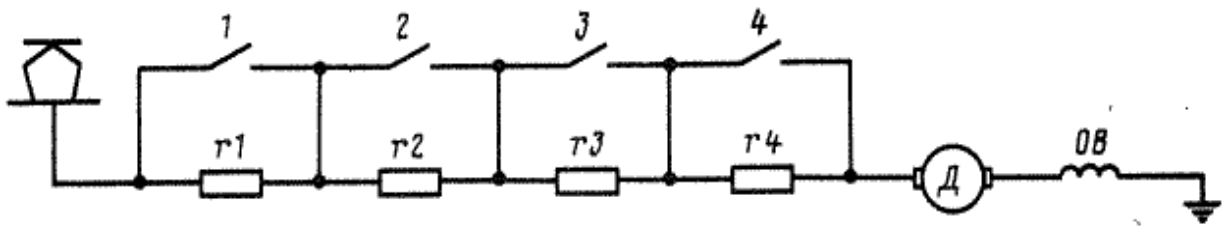
У свою чергу результатом зворотного ω -перетворення є вектор комплексних значень $\mathbf{x}(t)$. Тоді перехід до часової області, у якій подано вектор $\mathbf{X}(\omega)$, здійснюється відповідно до такого виразу:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}^{-1} \mathbf{X}(\omega) \quad (5.18)$$

Моделювання зміни тягового струму ТЕД, яке наведено у вигляді виразів (5.15) – (5.18), являє собою послідовність обчислень для визначення за апріорно встановленими значеннями векторів $\mathbf{X}(\omega)$ та $\mathbf{x}(t)$.

Оцінку адекватності моделювання виконаємо на основі порівняння розрахованих значень та наведених у довідковій літературі [256, 261] для тягового рухомого складу EP2 з ТЕД типу УРТ-110Б. Відповідно до наведеного в [256], спрощена схема з'єднання пускових резисторів та ТЕД

має вигляд, поданий на рисунку 5.10.

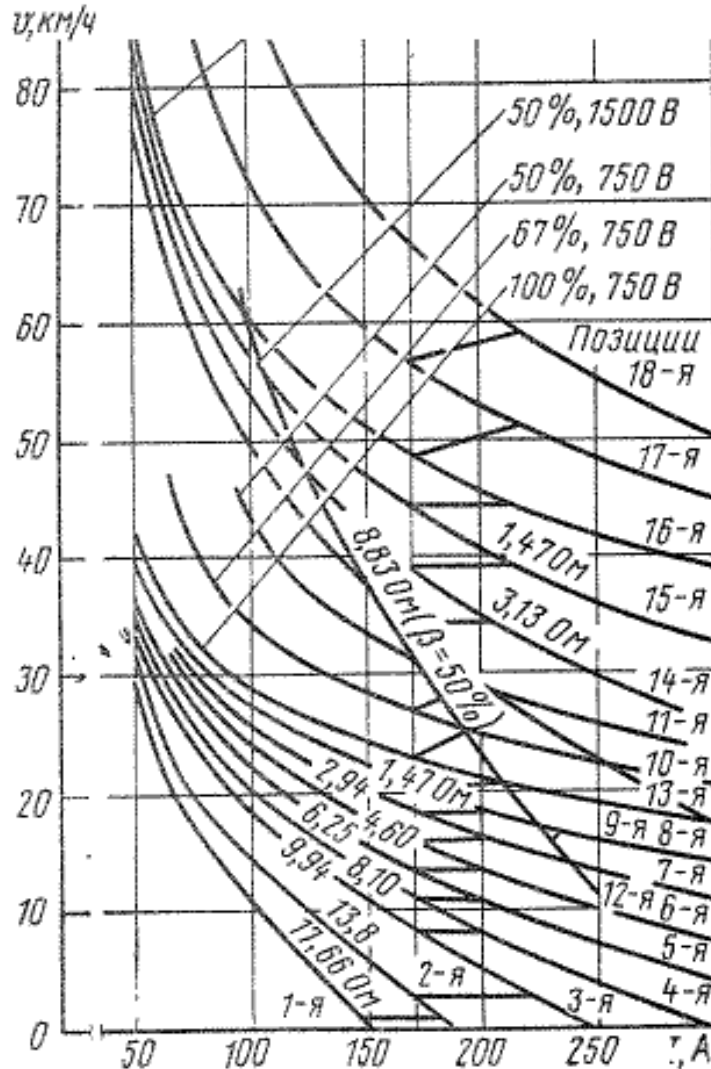


На рисунку наведені значення опорів при імпульсному переході на відповідну реостатну характеристику. При цьому перемикання виконується по мірі збільшення швидкості руху та зменшення тягового струму. Дев'ята позиція є природною (безреостатною).

Діаграму зміни пускового струму двигуна та збільшення швидкості руху МВРС, як її наведено в роботі [256], подано на рисунку 5.11.

Перехід на першу характеристику відбувається в момент часу , при цьому значення тягового струму складає 150 А, або 0,083 від . Установивши розмірність та виконавши моделювання у відповідності дних значень

тягового струму вигляді безпеки Відповідності характеристик тягового струму



истики, який у реостатної цесі зменшення

Рисунок 5.11 – Пускові характеристики моторного вагона EP2

У результаті перемикання реостатів струм миттєво збільшується до 180 А, тобто 0,1 від , або на 0,017 від попереднього значення. При цьому набуває вигляду, наведеного на рисунку 5.13.

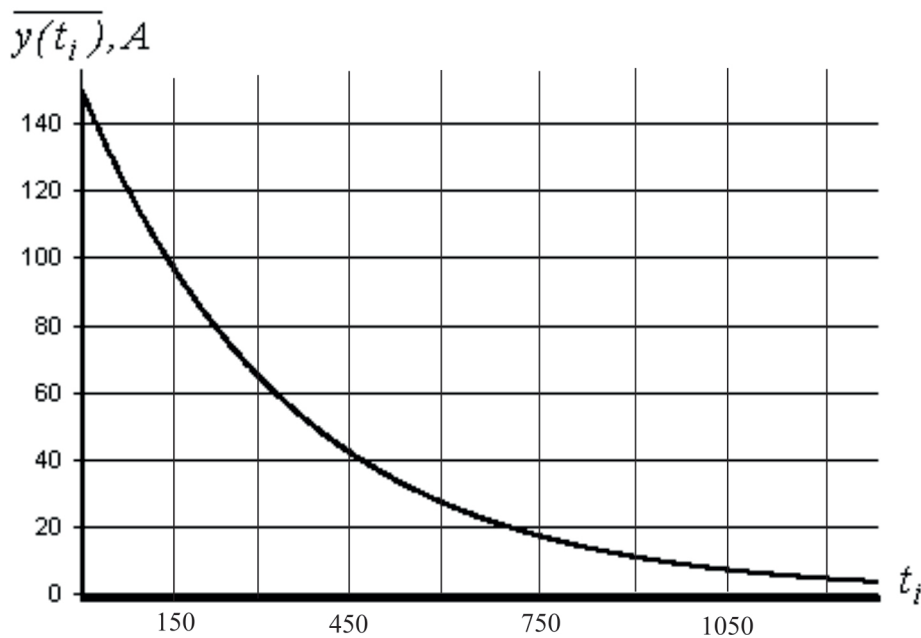


Рисунок 5.12 – Значення вектора для першої реостатної характеристики

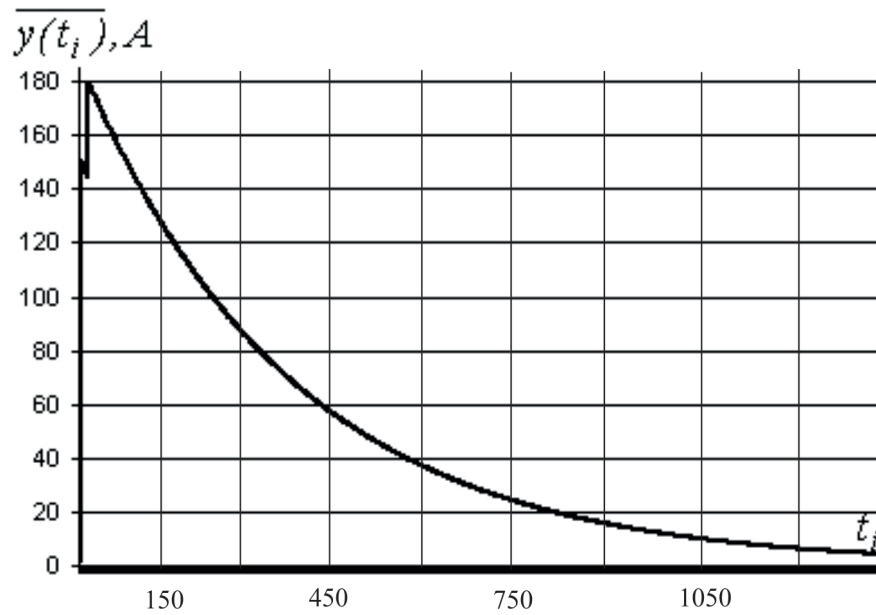


Рисунок 5.13 – Значення вектора $y(t_i), A$ після переходу з першої на другу реостатну характеристику

Аналогічно моделюється перехід до третьої реостатної характеристики в момент часу t_i , коли в процесі зменшення тягового струму він набуває значення 175 А. У результаті перемикання реостатів струм миттєво збільшується до 230 А, тобто 0,128 від $y(t_i)$, або на 0,03 від попереднього значення. Значення $y(t_i)$ наведено на рисунку 5.14.

Розраховавши подібним чином переходи на наступні реостатні характеристики, отримуємо значення вектора $y(t_i), A$, які для наочності суміщені з пусковими характеристиками моторного вагона ЕР2, з урахуванням припущень за значеннями фактичного нарощування швидкості руху та зі значеннями вхідного вектора $u(t_i), A$ (рисунок 5.15).

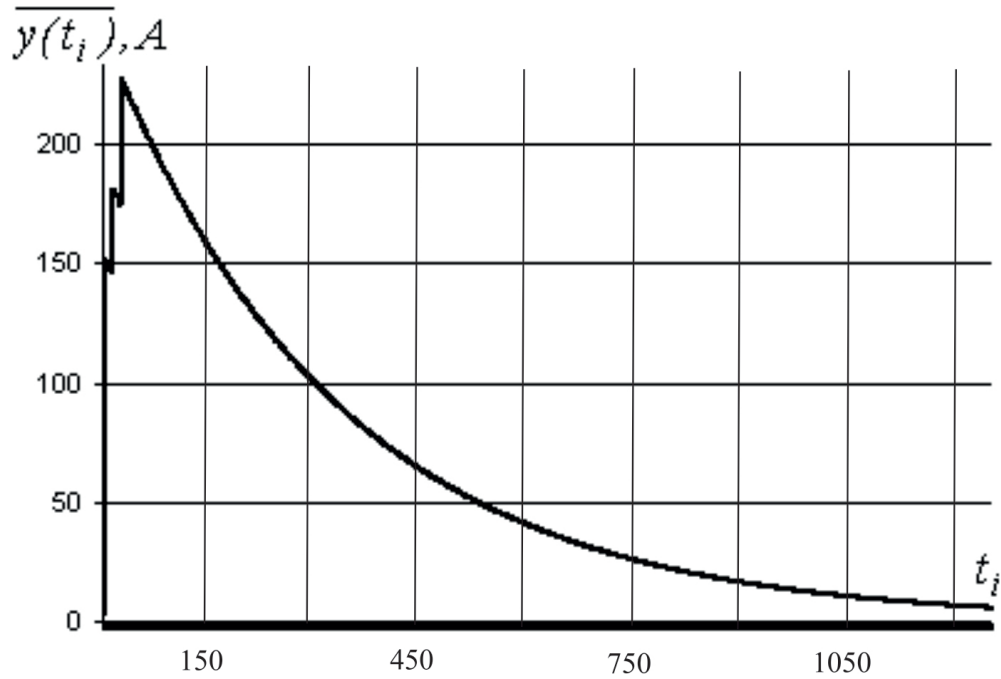
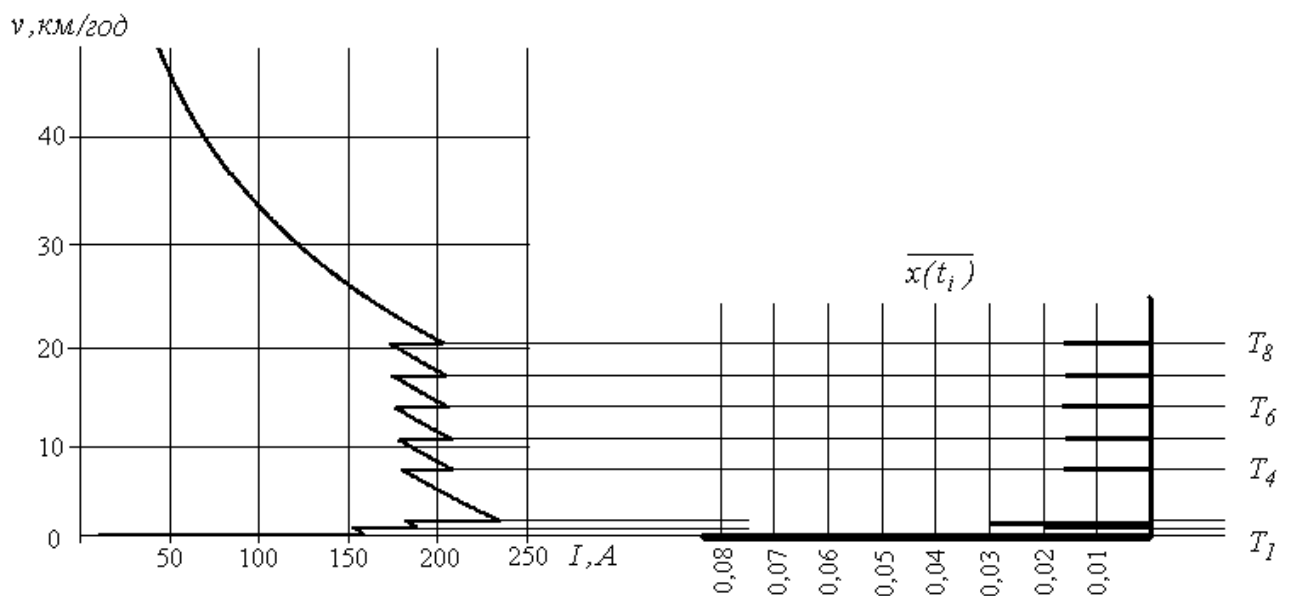


Рисунок 5.14 – Значення вектора $\overline{y(t_i)}$ після переходу з другої на третю реостатну характеристику



сумщенням відповідних реостатних характеристики зі значеннями вхідного вектора

Як видно з рисунка 5.15, він повністю повторює пускові характеристики моторного вагона ЭР2, наведені на рисунку 5.11, при русі з

напругою 750 В, яка подається на ТЕД.

Загальна похибка моделювання складається з двох чинників:

– сумарної похибки апроксимації імпульсної

характеристики ; – похибки дискретизації. Для розглянутого прикладу останній чинник набув такого значення:

Розглянемо зміст вхідного вектора . Так, кожне його значення показує, на скільки потрібно збільшити (зменшити) тяговий струм ТЕД в момент часу , тобто

де , – потрібне та діюче значення струму відповідно.

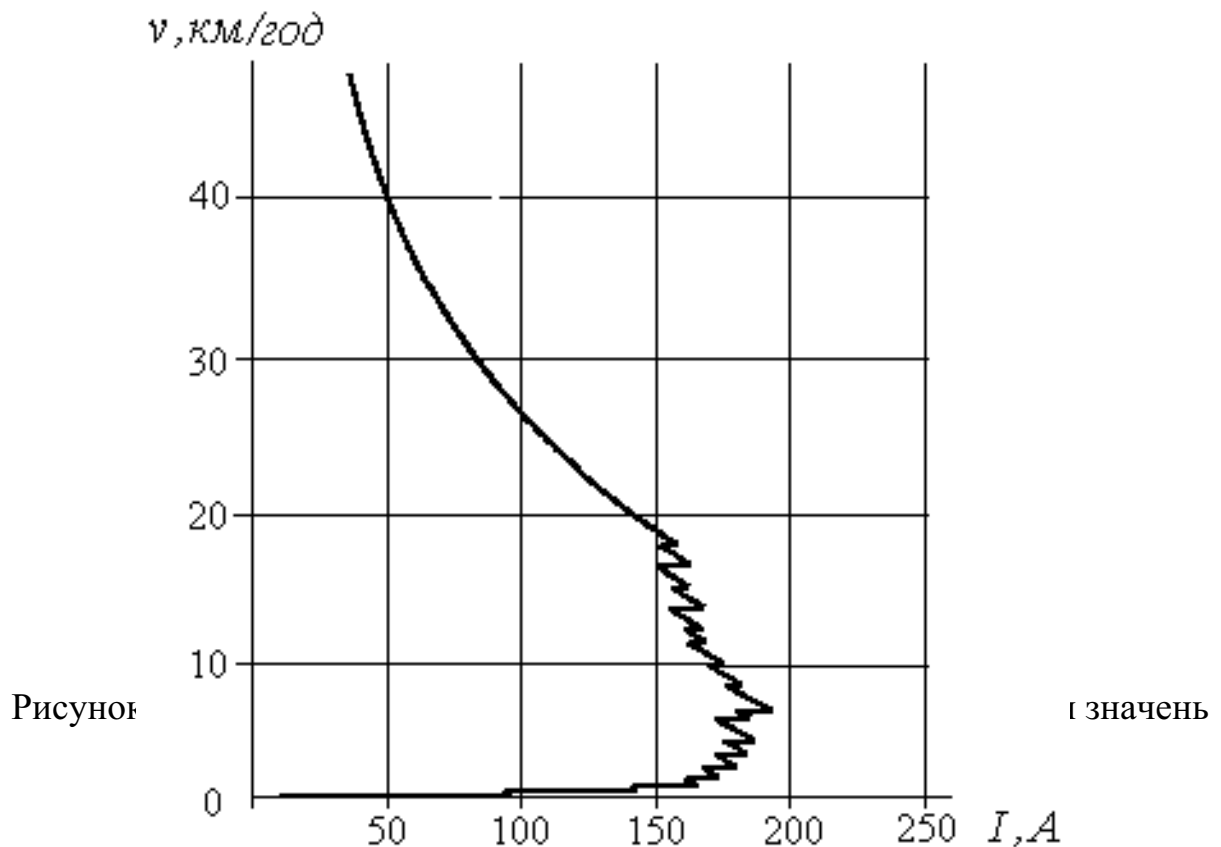
З точки зору практичної реалізації моделі, зміст вхідного вектора являє собою сигнал керування, який надходить на пристрій регулювання струму ТЕД. Втілення результатів моделювання, які розглянуто на прикладі пускових характеристик моторного вагона EP2 (див. рисунок 5.15), приведе до отримання результатів, подібних до автоматичного переходу на наступні реостатні позиції в процесі початку руху та нарощування швидкості МВРС. При цьому будуть спостерігатися такі ж різкі прискорення внаслідок значної зміни струму ТЕД. Для усунення подібного явища необхідно доповнити проміжними значеннями зміни струму. Так , наприклад, якщо потрібно у разів зменшити викиди струму в порівнянні з розрахованими для моторного вагона EP2 (див. рисунок 5.15), то вектор

потрібно перетворити таким чином:

$$, \quad (5.19)$$

де Δt – значення Δt , де Δt ; Δt – розрядність згладжування значень вектора \vec{v} .

Встановивши Δt та виконавши розрахунки значень v відповідно (5.15) - (5.19), отримуємо значення v , які подано на рисунку 5.16.



Як видно з рисунка 5.16, викиди струму при регулюванні стали значно меншими в порівнянні з I_{sc} , їх значення не перевищує 50 А.

Подальше зменшення викидів досягається збільшенням значень α у виразі (5.19), але можливий дещо інший розв'язок. Розглянувши вирази (5.10) – (5.15), та взявши до уваги зворотність перетворення Фур'є, слід зробити висновок про можливість розв'язання зворотної задачі: визначення

за апріорно встановленим α . У такій постановці вона найбільш актуальна при синтезі автоматичної системи керування МВРС в частині формування сигналу керування пристроєм регулювання струму ТЕД.

Для розв'язання зворотної задачі вирази (5.10), (5.14), (5.15) перетворюються таким чином:

$$I_{sc} = \frac{I_{sc}}{\alpha} \quad (5.20)$$

$$I_{sc} = \frac{I_{sc}}{\alpha} \quad (5.21)$$

$$I_{sc} = \frac{I_{sc}}{\alpha} \quad (5.22)$$

Для прикладу, який розглядається (МВРС EP2), сформулюємо зворотну задачу, як визначення керуючої послідовності у вигляді вектора для зміни струму, поданого вектором \vec{I}_{sc} (рисунок 5.17). Значення елементів I_{sc} розраховані за умовою приблизно постійного прискорення в процесі початку руху МВРС (за винятком перших моментів часу).

За змістом значення вектора \vec{I}_{sc} являють собою похідну зміни опору переходу IGBT-транзистора, який регулює значення струму ТЕД [386]. Цим обумовлено використання інтегруючої ланки в схемі регулювання (

рисунок 5.18).

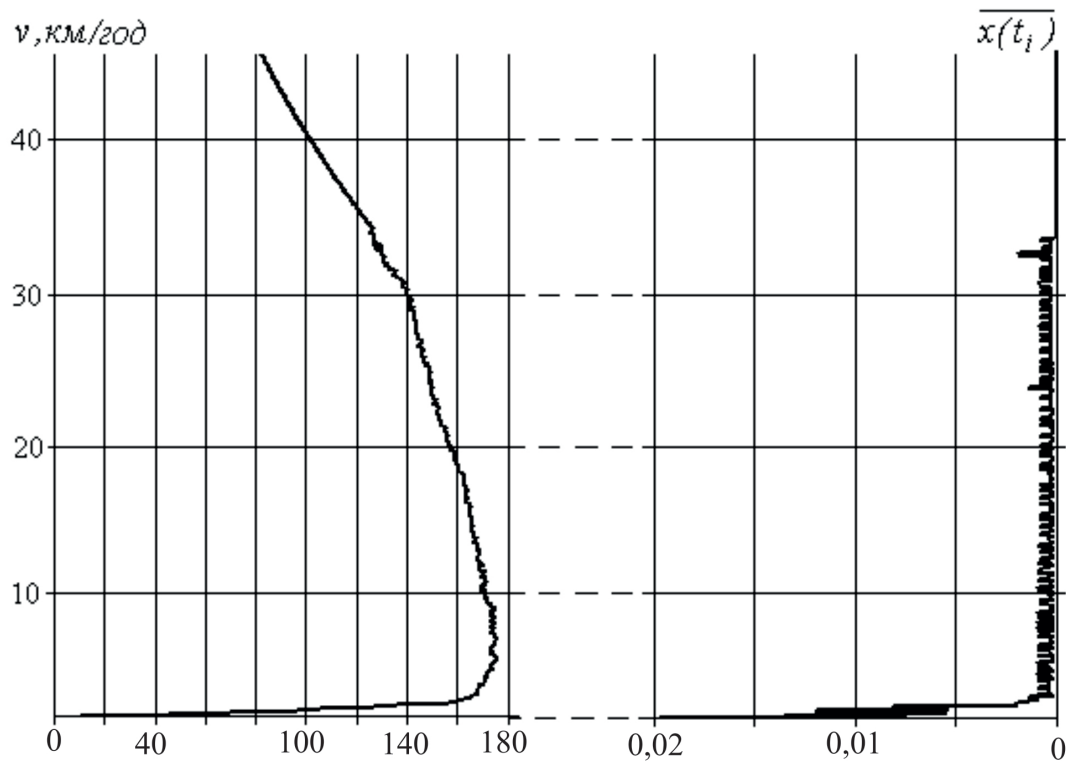


Рисунок 5.17 – Розраховані значення
задачі

при розв'язанні зворотної

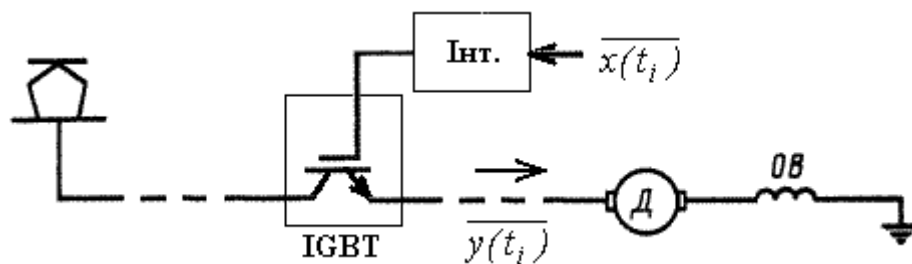


Рисунок 5.18 – Спрощена схема регулювання струму в двигуні Г-транзистором

Програма розрахунків і відображення пускових характеристик наведена у додатку Б.

Результати дослідження пускових режимів роботи ТЕП наведено на рисунку 5.19.

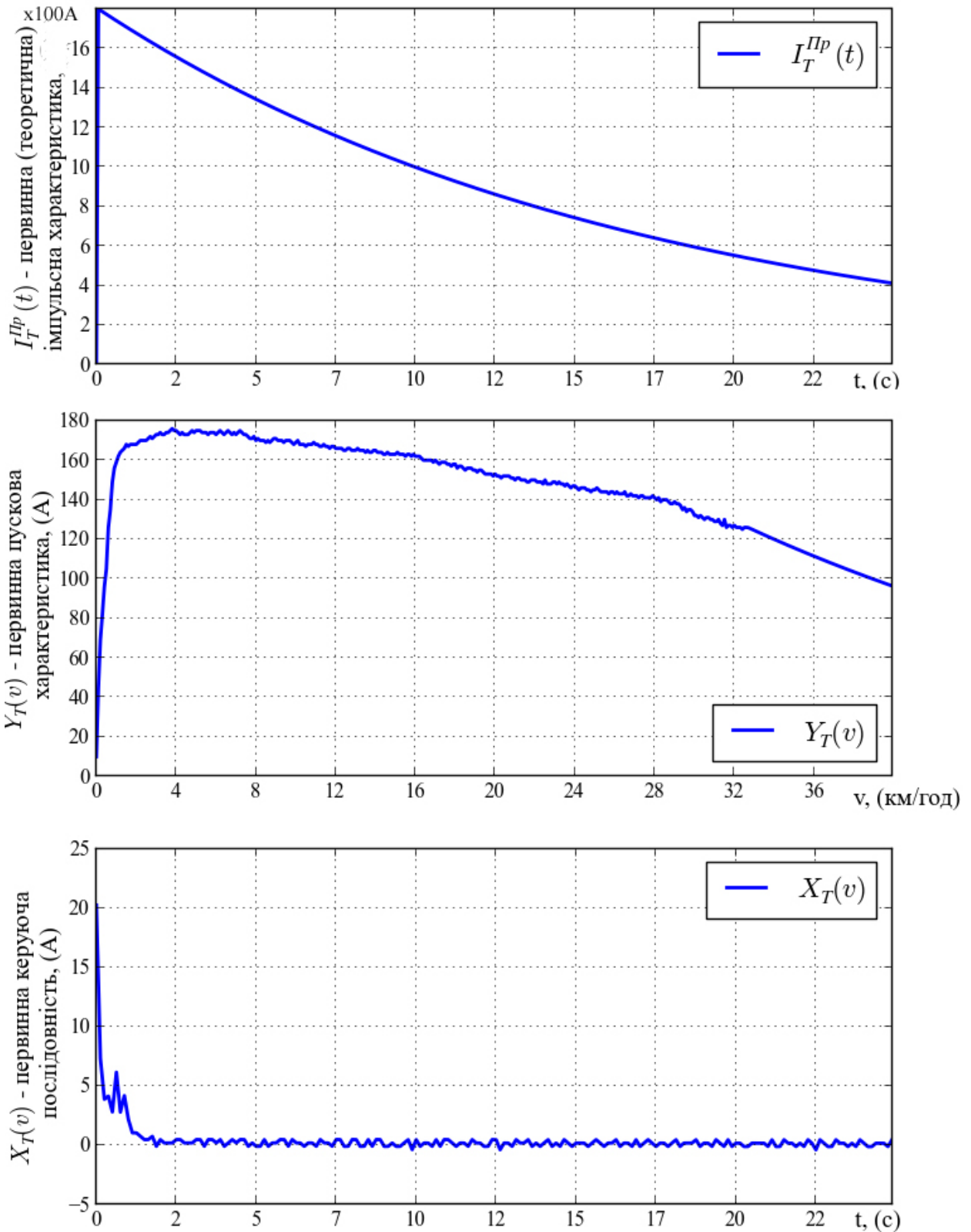


Рисунок 5.19 – Первинні дані для моделювання пускових характеристик тягових електродвигунів із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є

Процедура функціонування системи автоматичного корегування сигналів керування за апріорно встановленому режиму руху.

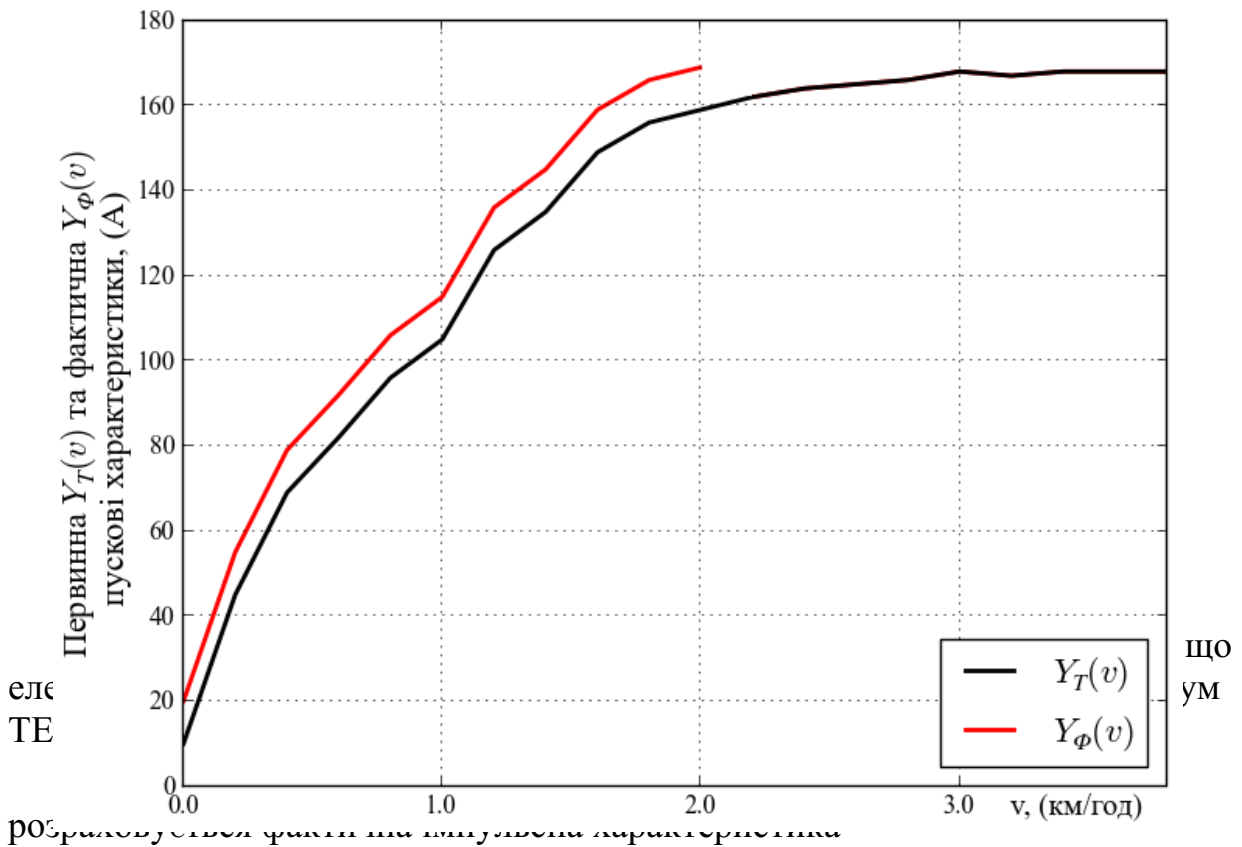
Початкові умови: апріорно встановлений оптимальний режим рушання (пускова характеристика) – $Y_T(v)$ (див. рисунок 5.19, б); населеність електропоїзду невизначена; період функціонування автоматичної системи корегування – 1 с.

1) Початок руху за первинними значеннями $I_T^{ПР}(t)$, $Y_T(v)$, $X_T(t)$, див. рисунок 5.22;

2) Фіксуються фактичні значення струму ТЕД та швидкості руху датчиками, встановленими на електропоїзді;

3) Через кожну секунду починає функціонувати автоматична корегування наступним чином:

а) Порівнюються первинні та фактичні значення $Y_T(v)$ та $Y_\Phi(v)$ (рисунок 5.20).



Результат розрахунку наведений на рисунку 5.21.

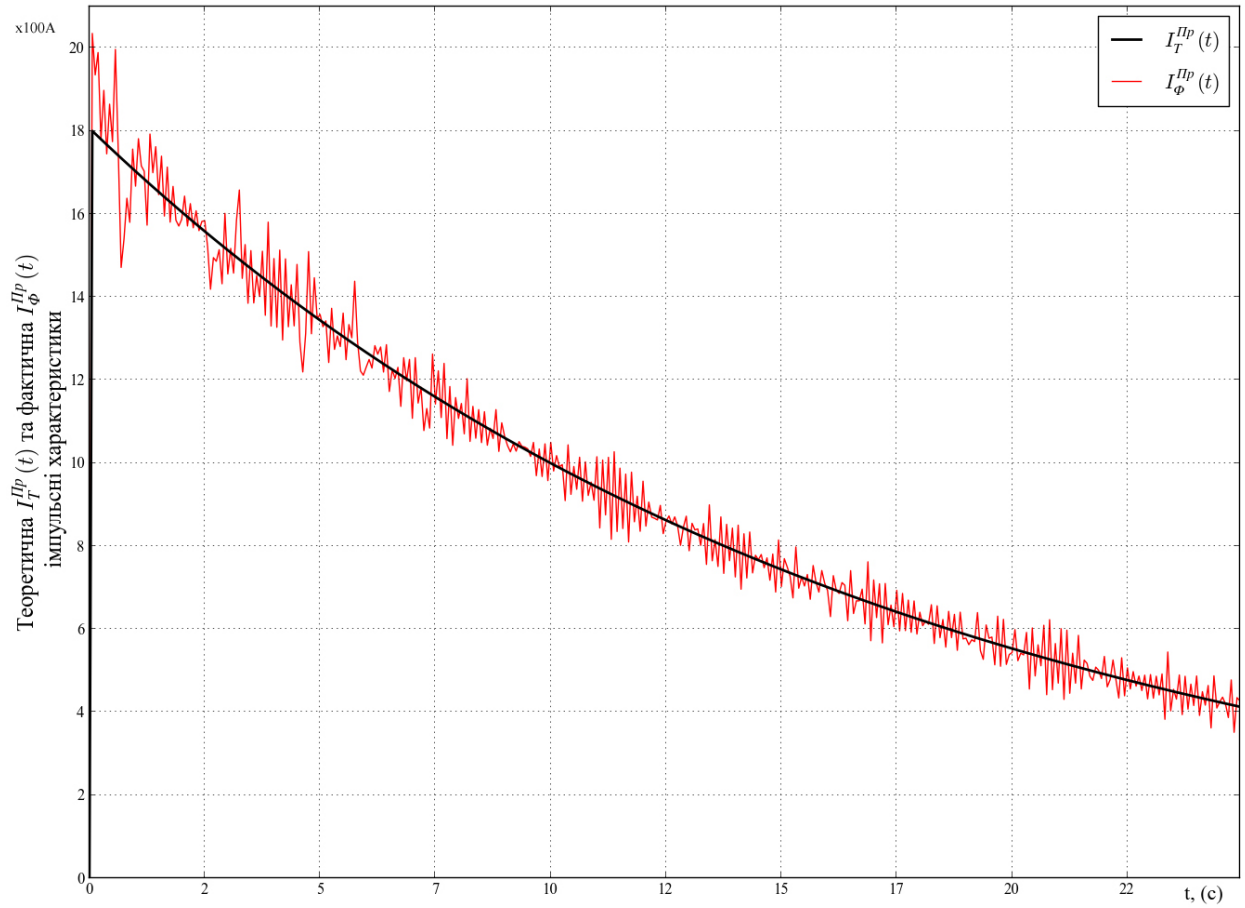


Рисунок 5.21 – Первинні та розраховані значення $I_T^{Пр}(t)$ та $I_\Phi^{Пр}(t)$

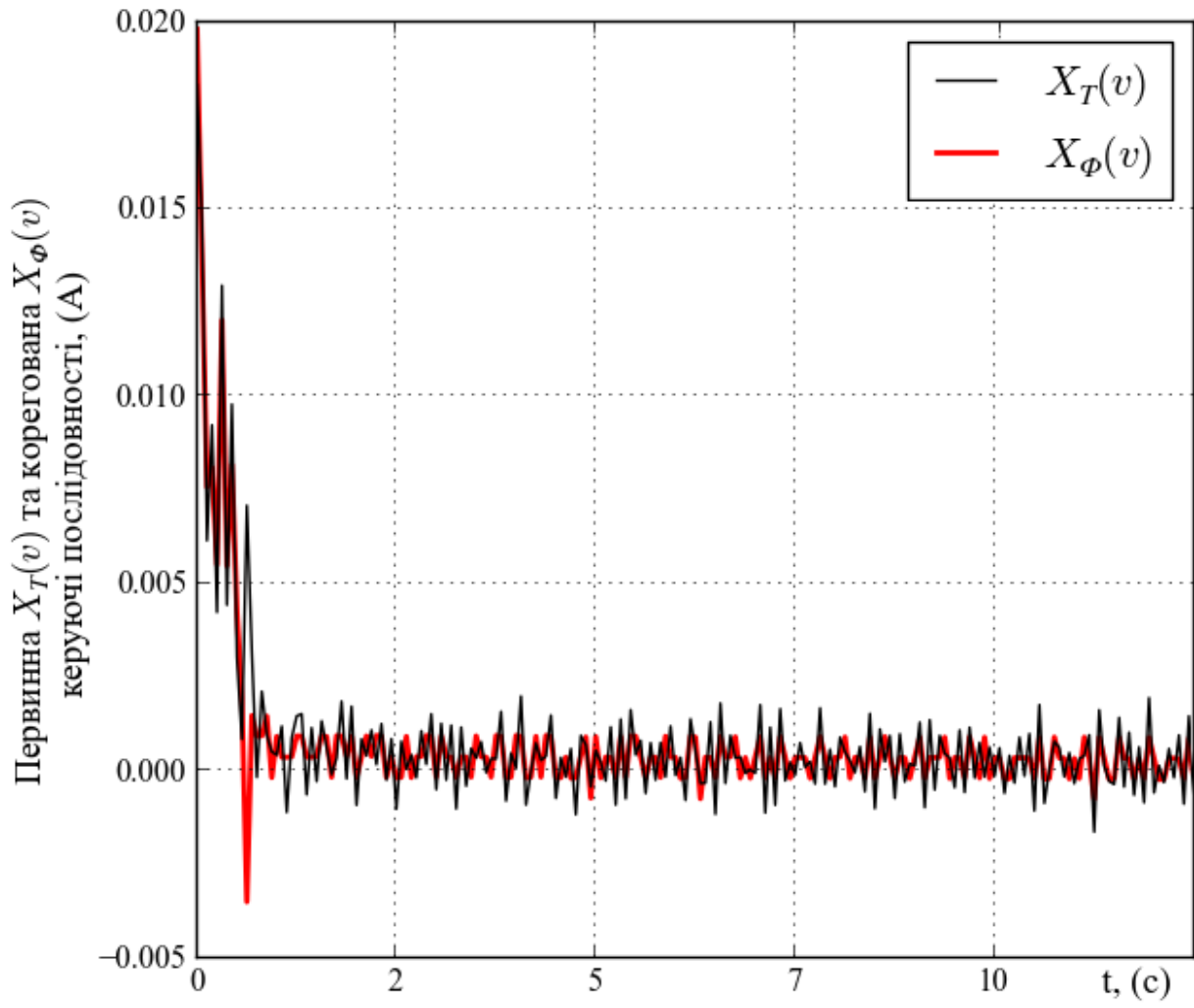


Рисунок 5.22 – Первинні та розраховані значення $X_T(t)$ та $X_\Phi(t)$

д) закінчення процедури корегування. Разом результати функціонування, після виконання першої процедури зображені на рисунку 5.23.

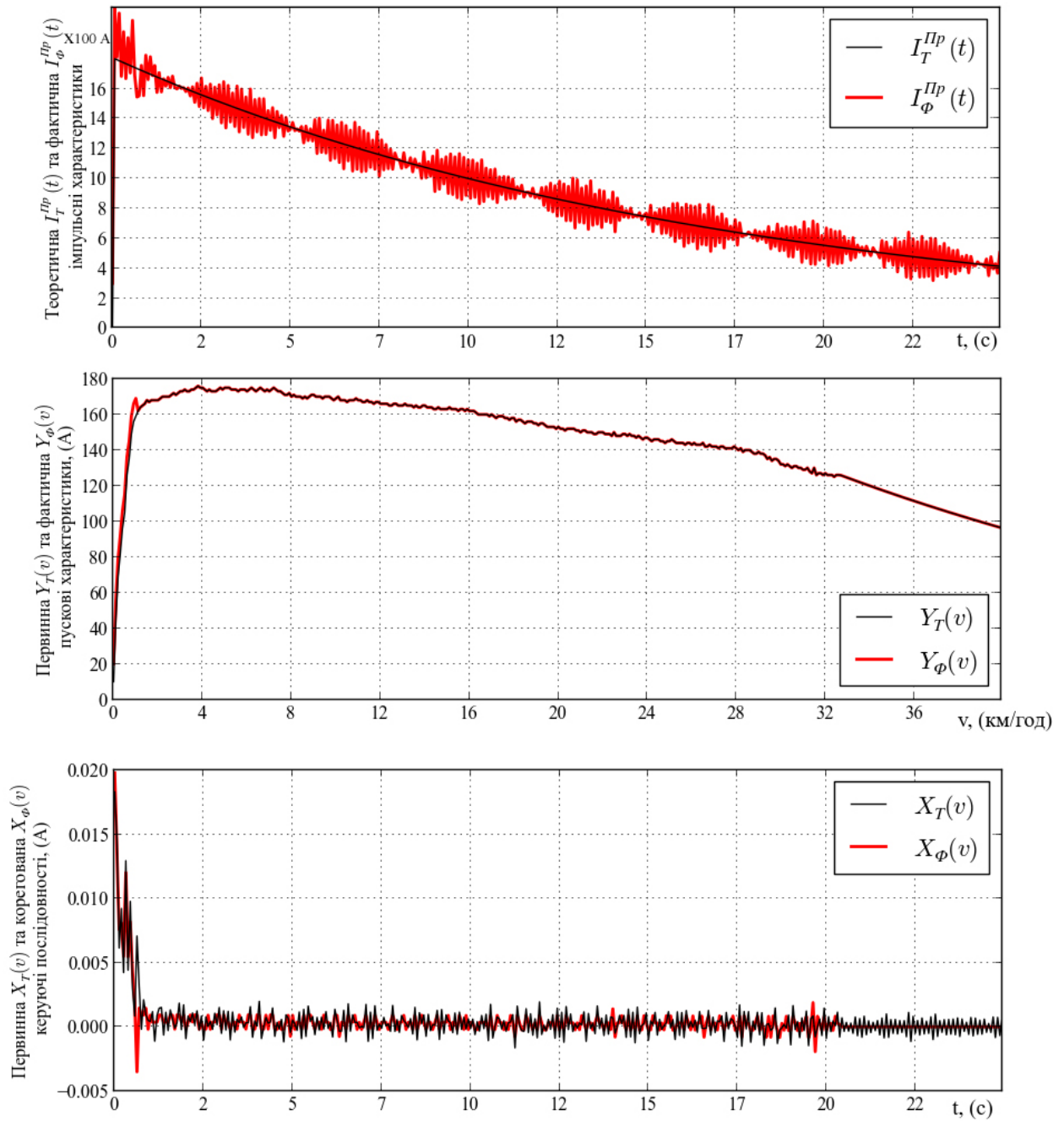


Рисунок 5.23 – Синхронізовані за часом результати функціонування моделі, після виконання першої процедури корегування

4) Результат функціонування алгоритму – автоматична стабілізація режиму руху електропоїзда за рахунок постійного корегування керуючої послідовності в залежності від дії випадкових факторів (рисунок 5.24).

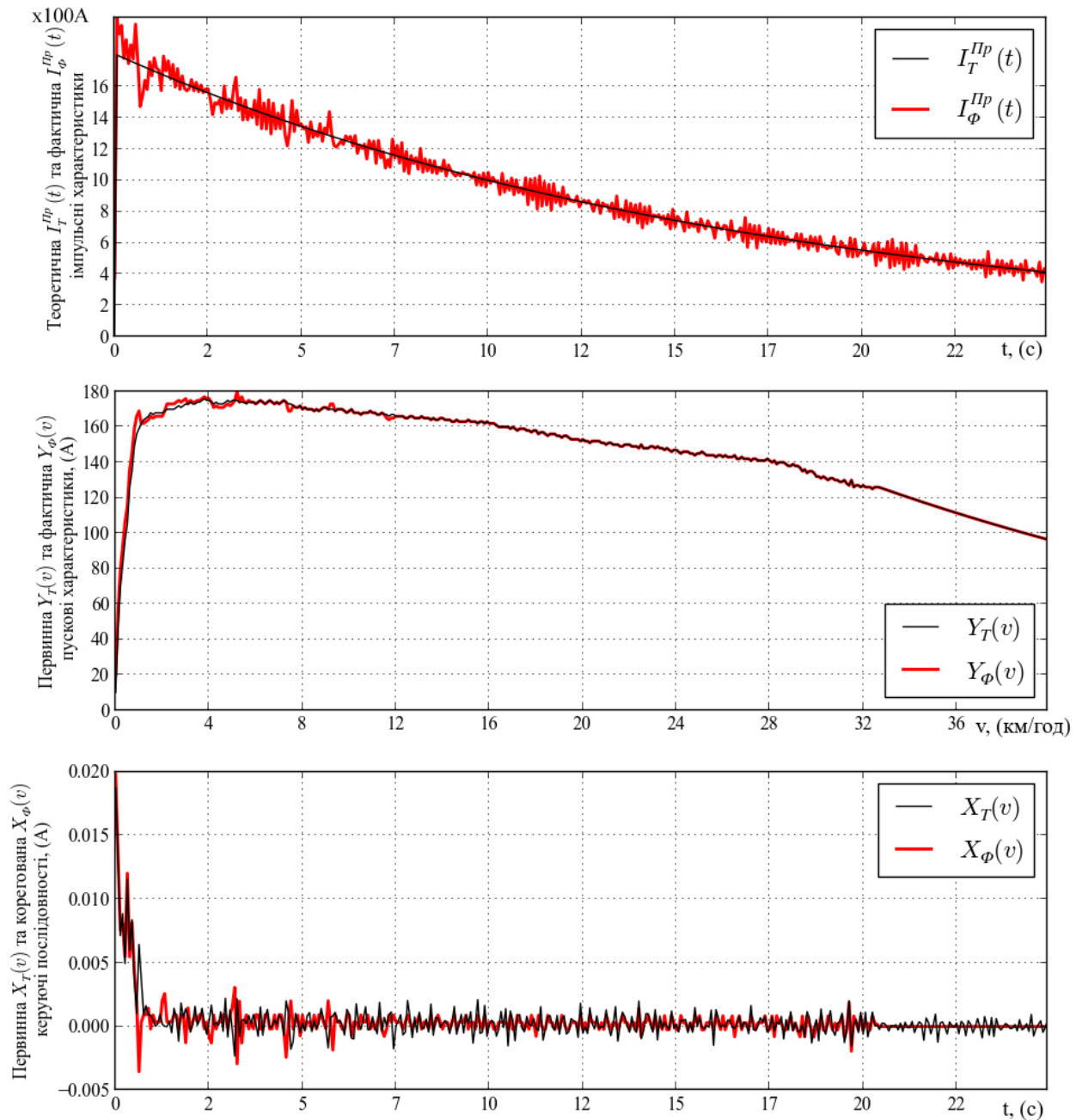


Рисунок 5.24 – Синхронізовані за часом результати функціонування алгоритму корегування керуючої послідовності за перші 24 секунди початку руху

Порівняння струмів ТЕД при реостатному та імпульсному керуванні для різних програм руху (прискорень) наведено на рисунку 5.25.

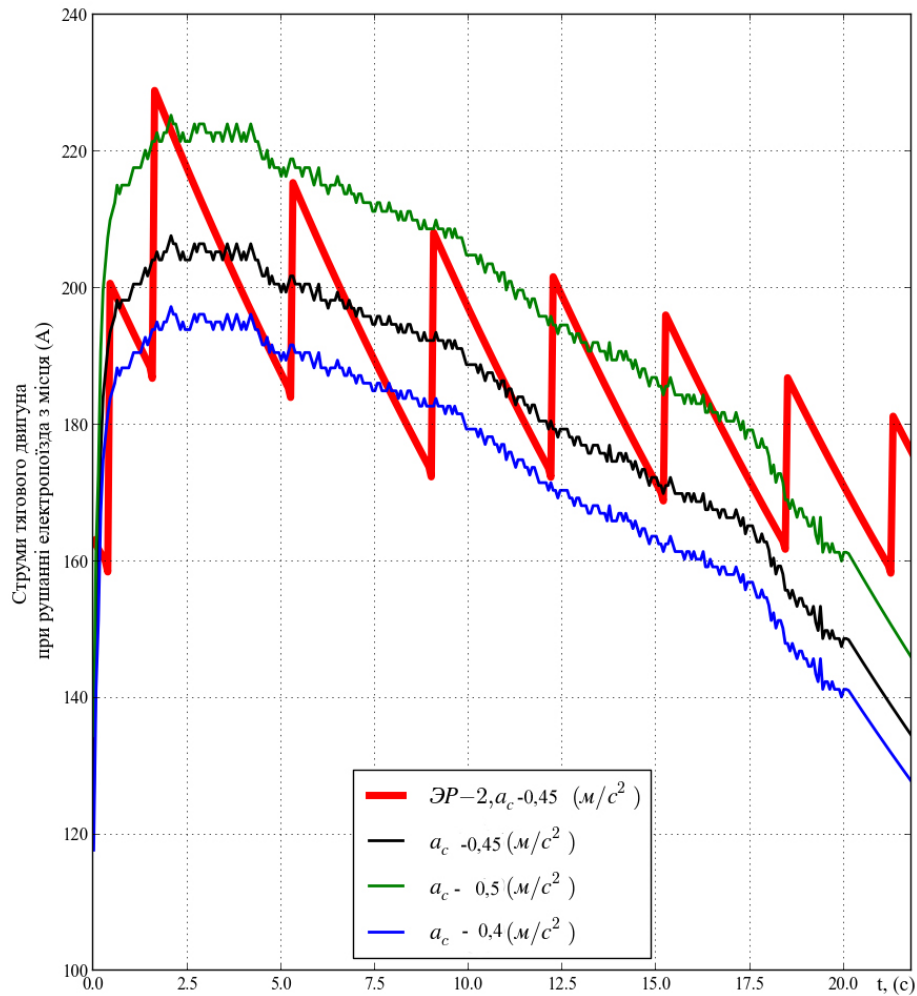


Рисунок 5.25 – Порівняння струмів ТВД при реостатному та імпульсному керуванні для різних програм руху (прискорень)

Загальна споживана електроенергія одним ТВД за перші 20 секунд початку руху при середніх прискореннях наступна:

реостатне ($\text{ЭР-2}, a_c = 0,45 \text{ м/с}^2$) – 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).

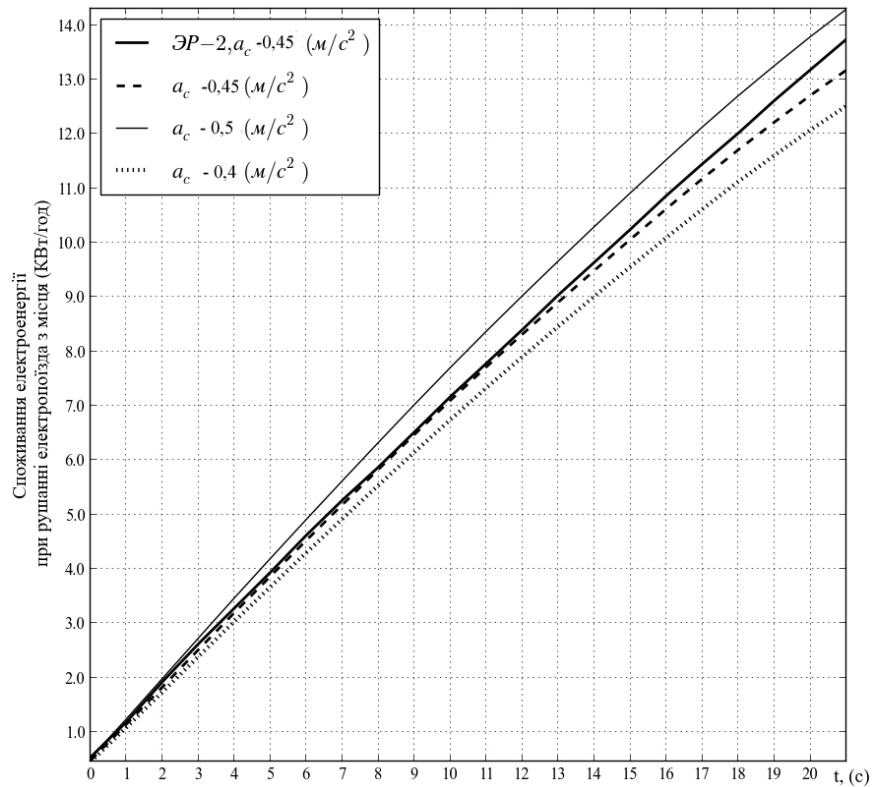


Рисунок 5.26 – Порівняння споживання електроенергії ТЕД при реостатному та імпульсному керуванні для різних програм руху

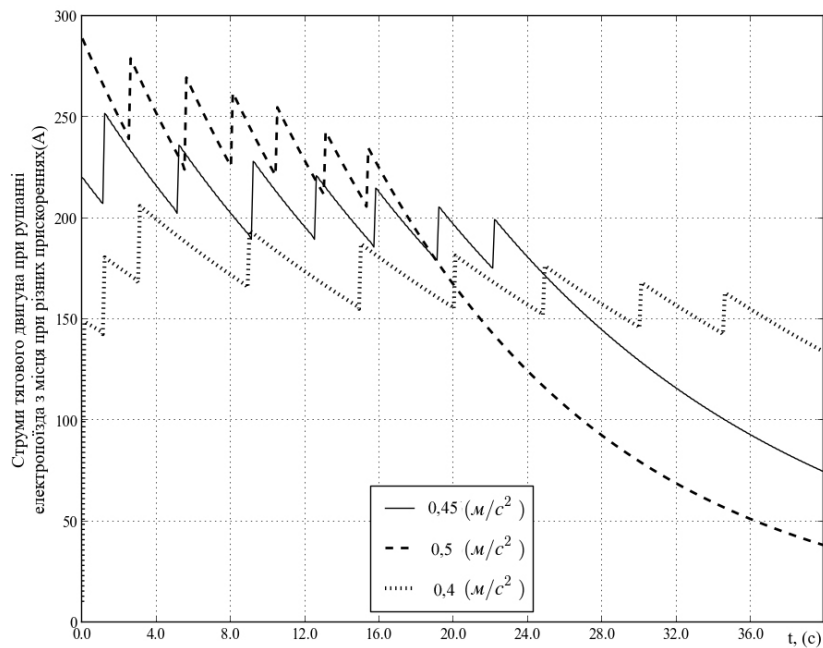


Рисунок 5.27 – Порівняння струмів ТЕД при реостатному режимі керування для різних прискорень

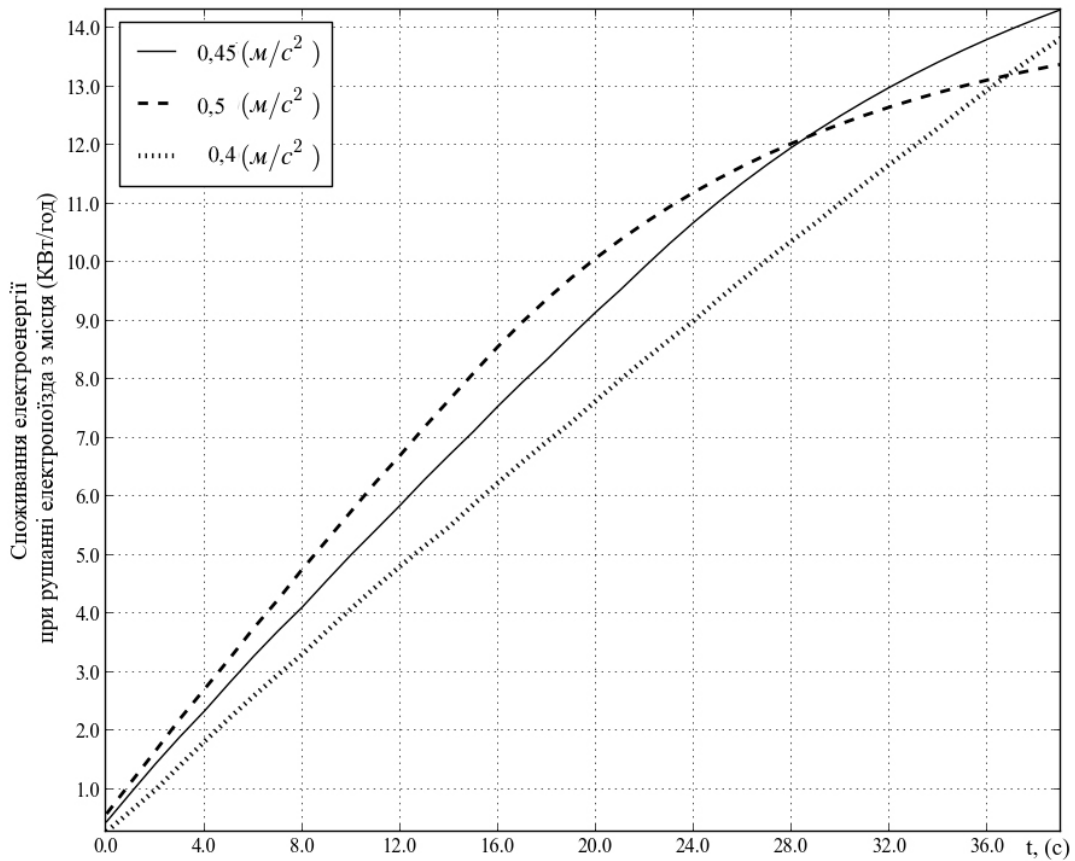


Рисунок 5.28 – Порівняння споживання електроенергії ТЕД при реостатному режимі керування для різних прискорень

Загальна споживана електроенергія одним ТЕД за перші 38 секунд початку руху при реостатному режимі керування для різних прискорень:

$$a_c = 0,4 \text{ м/с}^2 - 13,382 \text{ (кВт/год)};$$

$$a_c = 0,45 \text{ м/с}^2 - 13,626 \text{ (кВт/год)};$$

$$a_c = 0,50 \text{ м/с}^2 - 13,384 \text{ (кВт/год)}.$$

Заощадження електроенергії - 3,58 %

На рисунку 5.29 наведені процеси розгону електропоїзда EP2, отримані на моделях (2.5) і (2.6). Процеси розгону практично збігаються, що підтверджує коректність спрощення вихідної моделі (2.5). При цьому, найбільша похибка моделювання не перевищує 3,2 %.

V ,
км/ч

6
0

5

4

3

2

t ,
с

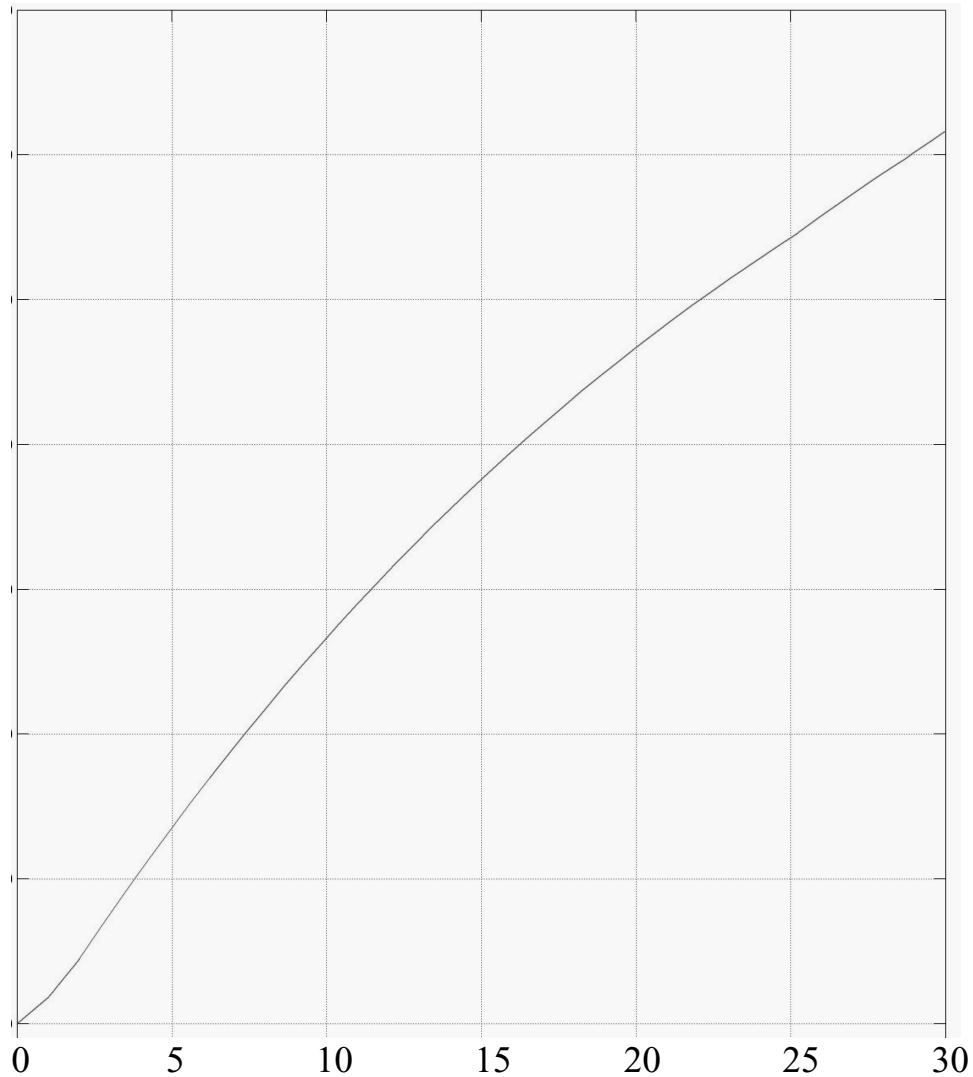


Рисунок 5.29 – Процеси розгону електропоїзда EP2

- 1 – графік розгону реального електропоїзда EP2,
- 2 – графік розгону, отриманий на моделі (2.5),
- 3 – графік розгону, отриманий на моделі (2.6).

5.5 Висновки до розділу 5

1 Запропоновано ефективні методи та моделі керування ТЕП, що дало змогу розробити структурну схему керування МВРС з урахуванням обмежень щодо комутації, температури двигуна й боксування та можливістю реалізації на основі рекурентної нейронної мережі RTRN.

2 Розроблено теоретичні основи керування МВРС на основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії, що реалізовано з використанням асоціативної пам'яті на основі дискретної нейронної мережі АРТ-1, яка може запам'ятовувати додаткову інформацію без викривлення вже наявної або повного перенавчання нейронної мережі. Оптимальне керування МВРС припускає вирішення завдання руху

поїзда з мінімальними витратами енергії за умови виконання графіка руху по перегону й дотриманням діючих обмежень на швидкість руху, прискорення й керування.

3 На основі нейронних мереж адаптивної резонансної теорії розроблена оригінальна асоціативна пам'ять для зберігання законів керування ТЕП рухомого складу, що була реалізована в процесі керування електропоїздами метрополітену. Вона дає змогу мінімізувати енергетичні витрати та забезпечує графік руху й комфортні умови перевезення пасажирів. Реалізація системи не вимагає внесення змін у силову схему електропривода вагона й у її систему керування. Для організації роботи нейронної мережі досить мати програмно-апаратне обладнання, до складу якого входить бортовий комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням і апаратний блок, за допомогою якого фіксується проходження поїзда через контрольні пункти, розташовані на певній відстані від станції, з подальшим визначенням у бортовому комп'ютері всіх параметрів руху поїзда (швидкість, прискорення, координата) й виведенням на дисплей інформації у вигляді реальної та рекомендованої траєкторії руху поїзда. Розроблений метод оптимізації руху поїзда має універсальність і може бути рекомендований до використання на всіх видах рухомого складу.

4 Теоретично обґрунтована можливість моделювання пускових характеристик тягових електродвигунів із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є, що дає змогу на відміну від існуючих ключових елементів – тиристорів, реалізувати на базі потужних транзисторів (наприклад IGBT) аналогове регулювання тягового струму з мінімальною кількістю гармонічних складових.

5 Установлено, що застосування як дискретного, так і аналогового методів регулювання тягового струму ґрунтується на моделюванні характеристик ТЕД. При цьому, в першому випадку здебільшого достатньо моделі, яка відтворює природну характеристику тягового двигуна. У другому – необхідно виконувати загальне моделювання, яке враховує характеристики ТЕД в різних реостатних режимах роботи, при цьому опір реостату повинен бути поданий аналоговою функцією часу.

На прикладі моторного вагона EP2 показано, що моделювання пускових характеристик ТЕД із використанням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є дає змогу оптимізувати процес регулювання тягового струму. В результаті моделювання встановлено, що споживання електроенергії одним тяговим двигуном за перші 20 секунд початку руху при різних режимах керування та середніх прискореннях наступна: реостатне (EP-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 ($a_c = 0,4 \text{ м/с}^2$) – 12,073 (кВт/год), що дозволяє при застосуванні запропонованих методів керування заощаджувати 3,58 % електроенергії. При цьому, найбільша похибка моделювання не перевищує 3, 2 %.

РОЗДІЛ 6

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ КЕРУВАННЯ ТЯГОВИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ МОТОРВАГОННОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

6.1 Соціально-політичні аспекти погіршення фінансово-економічного стану приміського залізничного транспорту

Найважливішою проблемою в роботі приміського залізничного транспорту є зменшення збитків від його функціонування. Відомо, що рівень покриття експлуатаційних витрат доходами від перевезень у приміському залізничному сполученні складає біля 15 %, тобто витрати перевищують сукупні доходи майже в 6,5 разів. Проблемі пошуку шляхів виходу зі скрутного економічного стану присвячено численні наукові дослідження. Організаційно-економічні аспекти її вирішення розглянуто останніми роками в роботах українських, російських вчених і фахівців [364-370]. Проте основні причини, що вкрай негативно впливають на дієздатність приміського залізничного транспорту, закладено ще за радянських часів і вони мають ознаки соціально-політичного характеру [371, 372].

Тенденція погіршення фінансового стану приміського залізничного транспорту склалась ще за часів СРСР, а за роки незалежності України суттєво посилилась. Глибинна причина цього полягає в соціально-політичному устрої Радянського Союзу, а саме в державній формі власності на засоби виробництва. У цих умовах держава була об'єктивно зацікавлена в зниженні собівартості суспільного продукту, що вироблявся всіма галузями народного господарства (як групи «А», так і групи «Б»).

Одним із суттєвих механізмів досягнення цієї мети з боку держави було стримування зростання вартості живої праці, тобто утримання заробітної плати на відносно невисокому рівні. Приріст валового суспільного продукту багато в чому забезпечувався на основі екстенсивного шляху економічного розвитку, а саме за рахунок залучення у виробничу сферу все більшого обсягу матеріальних і трудових ресурсів. У цих умовах гостра нестача робочої сили спонукала державу постійно залучати до виробництва мешканців сільської місцевості, насамперед приміських зон. Оскільки витрати на проїзд мешканців приміських зон до місць роботи (переважно підприємств, розташованих в містах) і назад є складовою загальної вартості робочої сили, то Радянська держава вимушена була штучно стримувати тарифи на проїзд у приміському залізничному транспорті, надаючи йому

статус «соціально значущого».

Крім того, в останні двадцять років існування СРСР на вимогу органів місцевої влади приміський залізничний транспорт був вимушений кожного дня у весняно-осінній період здійснювати масові безкоштовні перевезення робітників підприємств і установ міст до сільської місцевості для виконання сільгоспробіт, що з позиції держави посилювало його «соціальну значущість» і водночас погіршувало його фінансовий стан. Проте принципи директивно-розподільчої системи управління радянською економікою давали змогу здійснювати компенсацію збиткових «соціально-значущих» галузей і окремих підприємств за рахунок державного бюджету. В разі підвищення тарифів на приміські залізничні перевезення і припинення безкоштовних перевезень держава вимушена була б підвищити вартість живої праці і відповідно збільшити заробітну плату всім категоріям працівників.

Ураховуючи діючу на той час систему ціноутворення, це призвело б до збільшення собівартості продукції і послуг як у сфері матеріального виробництва, так і в невиробничій сфері. Причому загальна сума збільшення собівартості валового продукту значно перевищила б суму зростання тарифів, а відповідне зростання цін внаслідок збільшення собівартості негативно вплинуло б на курс радянської грошової одиниці (рубля), знизило б і так невисоку конкурентоспроможність нечисленної номенклатури продукції радянського виробництва, що поставлялась на зовнішні ринки, і мало б інші непередбачені негативні наслідки.

Втім, розпад СРСР і перехід України до ринкової системи економічних відносин не призвели до позитивних змін у роботі приміського залізничного транспорту. Навпаки, традиційне збереження за ним статусу «соціально-значущої» транспортної системи, і тому утримання приміських залізничних пасажирських тарифів на вкрай низькому економічно необґрунтованому рівні і водночас придбання всіх матеріальних ресурсів, необхідних для функціонування приміського залізничного транспорту, за ринковими цінами значно погіршило його фінансовий стан порівняно з радянським минулим. Більш того, в теперішніх умовах, коли переважають недержавні форми власності на засоби виробництва, низький рівень тарифів на приміські залізничні перевезення не стимулює роботодавців до відповідного збільшення вартості робочої сили, стримує зростання заробітної плати і, таким чином, дає їм змогу отримувати за рахунок цього додатковий прибуток. Приміський залізничний транспорт, що масово і дешево перевозить мешканців приміських зон, які працюють у містах, перетворюється у фінансового донора, який субсидує суб'єкти господарської діяльності переважно недержавної форми власності. Тобто фінансові ресурси, що недоотримає приміський залізничний транспорт, перетворюються в додатковий прибуток цих суб'єктів. Крім того, безкоштовні перевезення численного пільгового контингенту пасажирів компенсується місцевими органами влади тільки частково, що відчутно посилює негативні тенденції в його діяльності. Як наслідок, відсутність власних ресурсів для самофінансування, а також дефіцит державного бюджету і бюджетів

місцевих органів влади унеможлиблюють розширене відтворення цієї транспортної системи [371, 372].

Оскільки приміський залізничний транспорт не може, з одного боку, самостійно встановлювати тарифи (без узгодження з місцевими органами влади), а з другого – навіть упровадження економічно обґрунтованих тарифів зробило б його неконкурентоспроможним на ринку транспортних послуг, то для вирішення проблеми поліпшення фінансового стану актуалізуються задачі пошуку техніко-технологічних рішень, направлених на зниження собівартості перевезень.

6.2 Джерела отримання економічного ефекту від впровадження методів та моделей прогнозування ефективних параметрів керування тяговим електроприводом

Автоматизована система системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом дає змогу оптимізувати процес керування тяговим рухомим складом, виходячи з умов руху на конкретному маршруті, що визначаються:

- профілем колії на окремих ділянках маршруту;
- графіком руху електропоїзда;
- масою бруто електропоїзда (кількістю секцій);
- технічними характеристиками електропоїзда;
- погодними умовами та ін.

Ураховуючи вплив зовнішніх і внутрішніх чинників, що склалися на різних ділянках маршруту, застосування автоматизованої системи дає змогу визначити оптимальний швидкісний режим руху електропоїздів, що забезпечує найбільш раціональне використання тягових можливостей електродвигунів, гальмівних систем, деталей, вузлів і механізмів візків та інших агрегатів електропоїздів. Крім того, зменшується втомлюваність локомотивних бригад, що позитивно впливає на безпеку руху. Зазначені чинники обумовлюють скорочення витрат електроенергії на тягу поїздів, збільшення їх міжремонтного циклу, зниження темпів зносу інших вузлів і агрегатів електропоїздів і відповідно скорочення поточних витрат на їх експлуатацію.

Проте визначення загальної суми економічного ефекту від розроблення і впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом, що враховує всі можливі джерела його виникнення і форми його прояву, потребує значно більш поглибленого спеціального техніко-економічного дослідження. Трудомісткий і наукоємний характер такої роботи обумовлює залучення значної кількості фахівців-проектантів і експлуатаційників рухомого складу, науковців, економістів і відповідних фінансових і матеріальних ресурсів. Однак діючі нормативні вимоги до обсягу дисертаційної роботи обмежують масштаби такого дослідження. Виходячи з цього в роботі проведено економічну оцінку впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим

електроприводом, яка враховує два основні чинники виникнення економічного ефекту, а саме зниження витрат електроенергії і збільшення тривалості міжремонтного циклу ТЕД приміських електропоїздів.

6.3 Методичний підхід до оцінки економічної ефективності розроблення і впровадження методів ефективного регулювання та керування тяговим електроприводом

В основу методичного підходу, що застосовано для економічного обґрунтування доцільності практичного впровадження результатів дослідження, покладено прийняті у світовій практиці методи визначення економічної привабливості інноваційно-інвестиційних рішень в умовах ринкових форм господарювання [373-378]. Економічна ефективність упровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом підтверджується розрахунками комплексу показників, узагальнюючим з яких є показник приросту економічного ефекту від реалізації запропонованих інноваційних рішень, отриманого за розрахунковий період, з урахуванням можливої зміни вартості грошей за цей період, а також показників строку окупності одноразових витрат і внутрішньої норми дохідності проекту.

Сукупний приріст економічного ефекту за роки розрахункового періоду визначено як різницю між сумарною вартісною оцінкою результатів пасажирських перевезень приміськими електропоїздами (доходами, вигодами від перевезень) над вартісною оцінкою сукупних витрат всіх ресурсів на ці перевезення за розрахунковий період у діючих умовах і в умовах застосування запропонованого техніко-технологічного рішення з урахуванням приведення грошових потоків до останнього року розрахункового періоду (Компаундинг) [373 - 378], тобто як приріст майбутньої чистої вартості (*net future value NFV*)

, (6.1)

де , – відповідно сукупний економічний ефект від перевезень без застосування системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом і в умовах її застосування за розрахунковий період, грн;

, – відповідно вартісна оцінка сукупних результатів перевезень пасажирів приміськими електропоїздами (доходи) без застосування системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом і в умовах її застосування за розрахунковий період, що приведено до останнього року життєвого циклу проекту, грн;

, – відповідно вартісна оцінка сукупних витрат на перевезення пасажирів приміськими електропоїздами без застосування системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом і в умовах її застосування за розрахунковий період, що приведена до останнього року життєвого циклу проекту, грн.

Оскільки використання системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом не впливає на обсяги пасажиропотоків, то вартісна оцінка результатів роботи приміського залізничного транспорту (доходи) без її застосування і в умовах її застосування буде незмінною .

Тоді формула (6.1) набуде вигляду

(6.2)

або

(6.3)

де V_t , V_{t-1} – відповідно вартісна оцінка сукупних витрат на перевезення без застосування системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом і в умовах її застосування в році t розрахункового періоду, грн;

K – коефіцієнт приведення вартісної оцінки результатів (доходів) і витрат на перевезення в році t розрахункового періоду до останнього року розрахункового періоду;
 n – кількість років розрахункового періоду.

Сукупні витрати на перевезення пасажирів приміськими електропоїздами в кожному році розрахункового

періоду визначаються як підсумок одноразових витрат на науково-дослідні роботи і капітальних

витрат на технічні засоби, а також поточних експлуатаційних витрат на здійснення перевезень.

При цьому сума одноразових і експлуатаційних витрат зменшується на величину залишкової вартості або

ліквідаційного сальдо нових технічних засобів, що припадає на кінець розрахункового періоду [373-376]

(6.4)

Оскільки конструктивні особливості електронних технічних засобів автоматизації, що встановлюються на електропоїздах, не містять дорогоцінних металів і тому не мають будь-якої ліквідної вартості, то формула (7.4) набуває вигляду

(6.5)

При визначенні ефективності будь-якого інноваційного проекту слід урахувати можливу зміну вартості грошей за розрахунковий період, тобто вплив фактора часу на реальну величину економічного ефекту та інші показники ефективності в грошовому вимірі в різні роки розрахункового періоду. Зміна вартості грошей протягом розрахункового періоду обумовлена такими чинниками:

- пряий економічний ефект, який отримує залізниця від упровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом у різні роки її життєвого циклу, в подальшому буде направлено в господарський обіг, перш за все для інвестування техніко-технологічного розвитку приміського залізничного транспорту. Тобто за рахунок отриманого економічного ефекту будуть здійснюватись наступні інноваційні проекти, які стануть джерелом отримання додаткового (вторинного, реінвестиційного) економічного ефекту. Оскільки заздалегідь важко визначити напрямки реінвестицій, що будуть здійснюватись протягом розрахункового періоду, то, як прийнято у світовій практиці, при перспективній оцінці економічного ефекту від наступних інвестиційних рішень в умовах невизначеності виходять із найбільш безпечних умов отримання мінімально-гарантованої вигоди. Такими умовами вважаються розміщення інвестиційних ресурсів як депозитних внесків у банках протягом розрахункового періоду й одержання відповідних дивідендів (ефекту);

- на сукупну величину економічного ефекту (як прямого, так і реінвестиційного), що очікується отримати за цей період, неодмінно впливатимуть інфляційні процеси, які будуть обумовлені станом фінансової системи України. Як свідчить світовий досвід, інфляційних процесів майже неможливо уникнути, оскільки вони обумовлені об'єктивними чинниками (здорожчанням енергоресурсів, вартості живої праці та ін.), але можливо ефективно впливати на рівень і темпи інфляції шляхом упровадження інноваційних принципів економічного розвитку;

- реалізація будь-якого інноваційного проекту пов'язана з можливими різноманітними ризиками: зовнішньо- і внутрішньополітичними, соціальними, екологічними, фінансовими, природними тощо, які необхідно враховувати при економічному обґрунтуванні інноваційних рішень.

Усі зазначені фактори так чи інакше позначаються на ефективності впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом: отримання реінвестиційного економічного ефекту збільшить загальну його величину, а інфляційні процеси і можливі ризики в той же час обумовлять його зменшення.

Для урахування впливу цих факторів протягом розрахункового періоду (тобто зміни вартості грошей у часі)

для кожного року визначається відповідний коефіцієнт β_t . Цей коефіцієнт характеризує співвідношення номінальних і реальних грошових потоків у кожному році розрахункового періоду. При визначенні ефективності інноваційних проектів усі грошові потоки різних років можна приводити або до першого року (дисконтування), або до останнього року життєвого циклу (розрахункового періоду) (компаундування), тобто оцінювати ефективність проекту або в теперішній, або в майбутній вартості грошей. У дисертаційній роботі за розрахунковий рік прийнято останній рік здійснення проекту, де згідно з [373,374]

$$\beta_t = \frac{1}{(1+i)^t} \cdot (1-\pi)^t \cdot (1-\rho)^{t-1} \quad (6.6)$$

де β_t – коефіцієнт приведення грошових потоків (ефекту) різних років до останнього року розрахункового періоду;

- річна дисконтна ставка комерційних банків за депозитними внесками;
- річний рівень інфляційного очікування;
- ставка, що враховує ступінь ризику;
- порядковий номер розрахункового року (шостий – останній рік здійснення проекту);
- порядковий номер року розрахункового періоду, грошові потоки якого приводяться до розрахункового року.

З метою всебічної оцінки ефективності впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом визначено період окупності одноразових інвестиційних витрат, а також показник внутрішньої норми дохідності проекту (internal rate of return – IRR). Він показує, при якій дисконтній ставці комерційних банків економічний ефект буде дорівнювати нулю, тобто дає уявлення про «запас міцності» при погіршенні фінансового стану в Україні, що супроводжується збільшенням кредитних і депозитних ставок банків [375,376]

$$IRR = \frac{1}{\beta_t} \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \cdot (1-\pi)^t \cdot (1-\rho)^{t-1} \quad (6.7)$$

де i – діюча річна дисконтна ставка банків за депозитними внесками, яка використовується для розрахунку економічного ефекту;

- річна дисконтна ставка банків за депозитними внесками, при якій економічний ефект стає від'ємним;
- величина сукупного приросту економічного ефекту за розрахунковий період при діючій

дисконтній ставці i ;

- величина від'ємного приросту ефекту при дисконтній ставці i .

Оскільки впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом перш за все забезпечує економію електроенергії на тягу електропоїздів, то в дисертаційній роботі здійснено прогнозну оцінку вартості електроенергії в розрахунковому періоді. Для цього застосовано метод екстраполяції, а саме метод змінної середньої. Згідно з ним:

- проведено згладжування фактичних значень вартості електроенергії за попередні п'ять років;
- побудовано графік (тренд) згладженого ряду фактичних значень вартості електроенергії;

- проведено візуальний аналіз графіка і визначено математичну функцію, що найбільш точно описує тренд зміни вартості електроенергії за попередні роки;
- за допомогою методу найменших квадратів визначено параметри обраної функції;
- з використанням отриманої функції визначено прогнозні значення вартості електроенергії на розрахунковий період;
- визначено ступінь вірогідності отриманих прогнозних значень за критерієм кореляційного відношення і стандартну помилку прогнозу (можливі відхилення від прогнозних значень).

6.4 Визначення економічної ефективності впровадження методів регулювання та керування моторвагонним рухомим складом

Економічне обґрунтування ефективності розроблення і використання зазначеної системи здійснено виходячи з можливості її використання на приміських електропоїздах Південної залізниці, що входять до складу моторвагонних депо Харків, Люботин, Полтава.

Техніко-економічні показники роботи електропоїздів трьох моторвагонних депо у 2012 р. склали [379, 380]:

1. Кількість приміських електропоїздів, од. – 54.
2. Загальна кількість електросекцій, од. – 269.
3. Кількість ТЕД в електросекції, од. – 4.
4. Середній річний пробіг однієї електросекції, тис. км – 140.
5. Середня маршрутна швидкість руху електропоїзда, км/год – 39,4.
6. Потужність одного ТЕД, кВт – 200.
7. Середні витрати електроенергії на одну поїздо-годину до впровадження системи, кВт·год – 457.
8. Середні витрати електроенергії на одну поїздо-годину після впровадження системи, кВт·год – 432.
9. Вартість електроенергії на тягу поїздів в 2006-2010 рр., к./кВт·год:
2007 р. – 28,57;
2008 р. – 41,74;
2009 р. – 50,60;
2010 р. – 61,15;
2011 р. – 68,00.
10. Середня кількість ремонтів ТЕД за рік, рем. – 46.
11. Середня вартість одного ремонту ТЕД, грн – 52469.
12. Одноразові витрати на розроблення програмного забезпечення, тис. грн – 200.
13. Вартість одного приладу, тис. грн – 14,5.
14. Питомі витрати на один поїздо-кілометр електропоїздів, грн – 59,91.
15. Вартість електроенергії в питомих витратах на один поїздо-кілометр електропоїздів, грн – 7,90.
16. Кількість приладів на один електропоїзд, од. – 1.
17. Поточні витрати на обслуговування приладів за рік, тис. грн – 5.
18. Річна ставка банків за депозитними внесками, % – 15.
19. Річний рівень інфляційного очікування протягом розрахункового періоду, % – 6.
20. Ступінь ризиків – низький.
21. Коригування показника інфляції в умовах низького ступеня ризиків, % – 1.
22. Тривалість життєвого циклу проекту, роки – 6.
23. Розрахунковий рік життєвого циклу проекту – перший.

Економічне обґрунтування доцільності впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом на електропоїздах приміського сполучення виконано в такому порядку:

- здійснено прогнозування вартості електроенергії на тягу поїздів на період життєвого циклу проекту;
- визначено коефіцієнти проведення грошових потоків різних років життєвого циклу проекту до розрахункового року;

- визначено величину приросту економічного ефекту, що очікує отримати Південна залізниця від впровадження системи автоведення на приміських електропоїздах протягом її життєвого циклу за рахунок зменшення експлуатаційних витрат на електроенергію і ремонт ТЕД;

- визначено строк окупності одноразових інвестиційних витрат на впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом;

- визначено внутрішню норму дохідності реалізації проекту розроблення і впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом.

Нижче наведено розрахунки прогнозованої оцінки вартості електроенергії на тягу приміських електропоїздів методом змінної середньої [375, 381, 382].

Для визначення виду тренда зміни вартості електроенергії за попередні п'ять років проведено згладжування

фактичних значень вартості електроенергії на основі їх усереднення (таблиця 6.1). Для цього всі значення фактичного часового ряду зведено в групи по три значення шляхом переміщення на одне значення від початку значень до кінця їх часового ряду [375, 380, 381].

Аналіз виду графіка (рисунок 6.1) показав, що тренд зміни вартості електроенергії за попередні роки достатньо точно описується лінійною функцією вигляду

(6.8)

Параметри і функції (6.8) визначено методом найменших квадратів на основі розв'язання системи рівнянь [375, 381, 382]

(6.9)

де – кількість років, за які взято фактичну вартість електроенергії;

– порядковий номер року.

Таблиця 6.1 – Середні значення вартості електроенергії за 2006-2011 рр.

Рік	Фактична вартість електроенергії, к.	Розрахунок згладжених (усереднених) значень	Згладжені значення, к.
2007	28,57		29,28
2008	41,74		31,64
2009	50,60		49,83
2010	61,15		59,92

2011	68,00		68,62

На основі усереднених даних побудовано графік усереднених значень вартості електроенергії за попередні п'ять років (рисунок 6.1).

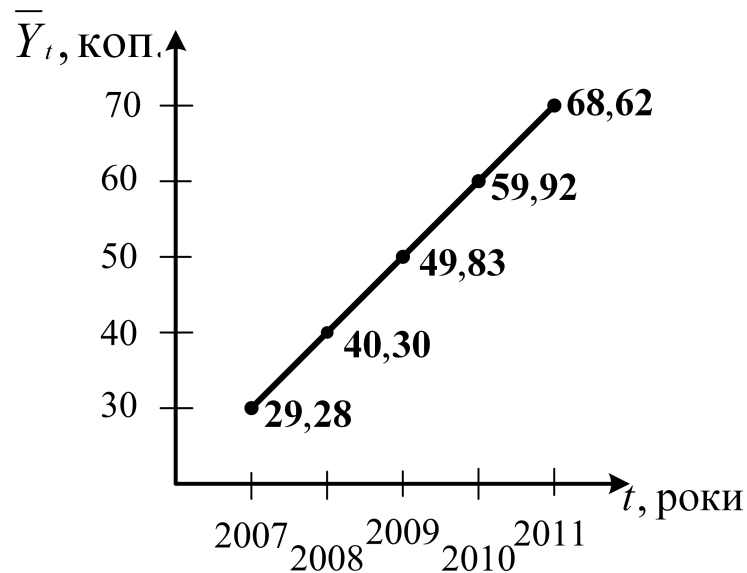


Рисунок 6.1 – Усереднені значення вартості електроенергії
Попередні розрахунки для розв'язання системи рівнянь (6.9) наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Розрахунки значень системи рівнянь

Рік				
2007	1	28,57	1	28,58
2008	2	41,74	4	83,48
2009	3	50,60	9	151,8
2010	4	61,15	16	244,6
2011	5	68,00	25	340,00
Разом	15	250,06	55	848,46

Отримані дані підставлено в систему рівнянь (6.9) і визначено параметри a і b лінійної функції

Таким чином, прогнозовані дані вартості електроенергії на наступні роки визначено за функцією

;

(к.);

(к.);

(к.);

(к.);

(к.);

(к.).

Визначено достовірність прогнозних значень з застосуванням кореляційного відношення [325,330]

$$,$$
 (6.10)

де – величина залишкової дисперсії;

– величина загальної дисперсії.

$$,$$
 (6.11)

де – кількість параметрів лінійної функції.

$$,$$
 (6.12)

де – середнє значення фактичної вартості електроенергії за попередні роки.

Попередні розрахунки значень і зведено в таблицю 6.3.

Таблиця 6.3 – Розрахунки значень залишкової та загальної дисперсії

Рік								
2007	1	28,57	30,35	-1,78	3,17	50,01	-21,44	459,67
2008	2	41,74	40,18	1,56	2,43	50,01	-8,27	68,39

2009	3	50,60	50,01	0,59	0,35	50,01	0,59	0,35
2010	4	61,15	59,84	1,31	1,71	50,01	11,14	124,01
2011	5	68,00	69,67	-1,67	2,79	50,01	11,99	323,64
Разом		-	-	-	10,45	-	-	976,06

На основі отриманих даних визначено величину залишкової і загальної дисперсії і кореляційного відношення

;

;

Рівень кореляційного відношення свідчить про високу якість прогнозних значень вартості електроенергії. При цьому величина стандартної помилки складає

(к.).

Визначено рівень інфляції за роки життєвого циклу проекту без урахування зростання вартості електроенергії, що прогнозується. Для цього:

- визначено частку вартості електроенергії в питомих витратах на один поїздо-кілометр приміських електропоїздів, яка склала 0,15 (7,90/51,35);

- визначено середньорічний рівень зростання вартості електроенергії за життєвий цикл проекту, який склав

0,11 ;

- визначено середньорічний рівень інфляції за роки життєвого циклу проекту без урахування зростання вартості електроенергії, %,

Для розрахунку величини економічного ефекту від впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом визначено значення коефіцієнтів зміни вартості грошей за розрахунковий період, а саме коефіцієнтів приведення грошових потоків до розрахункового (останнього) року життєвого циклу проекту за формулою (6.6)

;

;

;

З метою оцінки ступеня використання ТЕД приміських електропоїздів визначено середні коефіцієнти використання потужності ТЕД до впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом $\eta_{\text{ТЕД}}$ і в умовах її використання

$$\eta_{\text{ТЕД}} = \frac{P_{\text{ТЕД}}}{P_{\text{ТЕД}} + P_{\text{втр}}}, \quad (6.13)$$

де $P_{\text{ТЕД}}$ – питомі витрати електроенергії на 1 поїздо-годину до і після впровадження системи автоведення поїздів, кВт·год;

$P_{\text{втр}}$ – максимальні питомі витрати на 1 поїздо-годину, кВт·год.

$$\eta_{\text{ТЕД}} = \frac{P_{\text{ТЕД}}}{P_{\text{ТЕД}} + P_{\text{втр}}}, \quad (6.14)$$

де $P_{\text{ТЕД}}$ – потужність одного електродвигуна, кВт;

n – кількість електродвигунів у секції;

k – кількість секцій в електропоїзді.

коефіцієнти середнього використання потужності ТЕД до і після впровадження системи автоведення складають

;

Розрахунок приросту економічного ефекту від впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом за життєвий цикл проекту на трьох моторвагонних депо Південної залізниці наведено в таблиці 6.4.

Визначено період окупності одноразових інвестиційних витрат на розроблення і впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом, який впливає з умови [374, 375, 377]

(6.15)

Тобто одноразові витрати окупляться в той рік, коли сума одноразових витрат, приведених до останнього року розрахункового періоду, дорівнюватиме або стане меншою за сукупну величину приросту економічного ефекту, отриману за відповідну кількість років розрахункового періоду (наростаючим підсумком).

Таблиця 6.4 – Розрахунок приросту економічного ефекту від впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом

Показник	Життєвий цикл проекту (розрахунковий період), роки					
	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
А. Витрати до впровадження системи						
1 Кількість приміських електропоїздів, поїзд		54	54	54	54	54
2 Загальна кількість електросекцій, секція		269	269	269	269	269
3 Кількість ТЕД в електросекції, од.		4	4	4	4	4
4 Загальна кількість ТЕД в електропоїздах, од. (ряд. 2хряд. 4)		1076	1076	1076	1076	1076
5 Середній річний пробіг однієї секції, тис. км		140	140	140	140	140
6 Середня маршрутна швидкість руху електропоїздів, км/год		39,4	39,4	39,4	39,4	39,4
7 Середня кількість відпрацьованих годин за рік однією секцією, год (ряд. 5:ряд. 6)		3553	3553	3553	3553	3553
8 Потужність одного ТЕД, кВт		200	200	200	200	200

Продовження таблиці 6.4

1	2	3	4	5	6	7
9 Середній коефіцієнт використання потужності ТЕД		0,114	0,114	0,114	0,114	0,114
10 Кількість електро-енергії, спожитої за рік на тягу поїздів, тис. кВт·год (ряд. 4хряд. 7х хряд. 8хряд. 9)		87165	87165	87165	87165	87165
11 Вартість електро-енергії (прогнозна), грн/кВт·год		0,8933	0,9916	1,0899	1,1882	1,2865
12 Витрати на електро-енергію на тягу поїздів за рік, тис. грн (ряд. 10хряд. 11)		77864,5	86432,8	95001,1	103569,5	112137,8
13 Середня кількість ремонтів ТЕД за рік, рем.		46	46	46	46	46
14 Середня вартість одного ремонту, грн		52469	52469	52469	52469	52469
15 Витрати на ремонт ТЕД за рік, тис. грн		2413,6	2413,6	2413,6	2413,6	2413,6
16 Загальні річні витрати на електро-енергію на тягу поїздів і ремонти ТЕД, тис. грн (ряд. 12+ ряд. 15)		80278,1	88846,4	97414,7	105983,1	114551,4

Продовження таблиці 6.4

1	2	3	4	5	6	7
Б. Витрати після впровадження системи						
17 Одноразові витрати на розроблення програмного забезпечення, тис. грн	200					
18 Вартість однієї системи, тис. грн	14,5					
19 Кількість систем на весь парк електропоїздів	54					
20 Витрати на системи для обладнання всього парку електропоїздів, тис. грн (ряд. 18хряд. 19)	783					
21 Поточні витрати на обслуговування систем за рік, тис. грн						

		5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
22 Середній коефіцієнт використання потужності ТЕД						
		0,108	0,108	0,108	0,108	0,108
23 Кількість електро-енергії, спожитої за рік на тягу поїздів, тис. кВт·год (ряд. 4хряд. 7ххряд. 8хряд. 22)						
		82577	82577	82577	82577	82577

Продовження таблиці 6.4

1	2	3	4	5	6	7
24 Витрати на електроенергію на тягу поїздів за рік, тис. грн (ряд. 11хряд. 23)						
		73748,2	81883,4	90000,7	98118,0	106235,3
25 Збільшення терміну міжремонтного циклу ТЕД, %						
		13	13	13	13	13
26 Середня кількість ремонтів ТЕД за рік, рем.						
		41	41	41	41	41
27 Витрати на ремонт ТЕД за рік, тис. грн (ряд. 14хряд. 26)						
		2151,2	2151,2	2151,2	2151,2	2151,2
28 Загальні річні витрати, тис. грн (ряд. 24+ряд. 27)						
	983	75899,4	84034,6	92151,9	100269,2	108386,5
29 Приріст економічного ефекту за рік, тис. грн (ряд. 16–ряд. 28)						
	-983	4378,7	4811,8	5262,8	5713,9	6164,9
30 Коефіцієнт приведення економічного ефекту різних років життєвого циклу проекту до розрахункового (останнього) року						
	1,54	1,41	1,30	1,19	1,09	1,0

Продовження таблиці 6.4

1	2	3	4	5	6	7
31 Приріст економічного ефекту з урахуванням приведення до розрахункового року тис. грн (ряд. 29хряд. 30)						

	-1512,5	6173,0	6255,3	6262,7	6228,2	6164,9
32 Економічний ефект наростаючим підсумком, тис. грн	-1512,5	4660,5	10915,8	17178,5	23406,7	29571,6

З розрахунків економічного ефекту видно, що одноразові витрати окупляться у першій половині другого року реалізації проекту, тобто на першому році експлуатації системи (1512,5 – 4660,5).

Для оцінки впливу можливого погіршення фінансового стану в Україні протягом життєвого циклу проекту на сукупну величину економічного ефекту за цей період визначено внутрішню норму дохідності (рентабельності) проекту (IRR).

Для цього експертним шляхом визначено величину дисконтної ставки банків за депозитними внесками, за якою сукупна величина економічного ефекту, приведена до розрахункового року, стає від'ємною, і на основі цього за допомогою методу інтерполяції визначено величину дисконтної ставки банків за депозитними внесками, при якій загальна сума економічного ефекту буде дорівнювати нулю. Визначено, що при річній дисконтній ставці банків у 455 % сукупна величина економічного ефекту за розрахунковий період стає від'ємною (таблиця 6.5).

Таблиця 6.5 – Визначення від'ємної величини економічного ефекту при збільшенні дисконтної ставки банків

Показник	Життєвий цикл проекту (розрахунковий період), роки					
	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
1 Приріст економічного ефекту за рік (ряд. 29, табл. 6.4), тис. грн	-983	4378,7	4811,8	5262,8	5713,9	6164,9
2 Річна дисконтна ставка за депозитними внесками (455 %), од.	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55	4,55
3 Коефіцієнт приведення до розрахункового року	5265,81	948,79	170,95	30,80	5,55	1
4 Приріст економічного ефекту з урахуванням приведення до розрахункового року (ряд. 1хряд. 3), тис. грн	-5176488,1	4154166,5	822377,1	162004,1	31712,0	6164,9
5 Приріст економічного ефекту наростаючим підсумком, тис. грн	-5176488,1	1022321,6	199944,5	37940,4	6228,4	-63,5

Розрахунки показують, що при річній дисконтній ставці за депозитними внесками в 455 % загальна сума приросту економічного ефекту буде від'ємною (-63,5 тис. грн).

Виходячи з даних таблиці 6.5 внутрішня норма дохідності проекту (IRR) згідно з формулою (6.7) складе

Тобто сукупний економічний ефект від впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом за життєвий цикл проекту буде дорівнювати нулю за умови, що річна дисконтна ставка банків за депозитними внесками складе 454 % (що відповідає щомісячній дисконтній ставці в розмірі 15,3 % при застосуванні складних відсотків при нарахуванні дивідендів, а саме в разі щомісячної капіталізації внесків). Оскільки така ситуація можлива лише за умови гіперінфляції і руйнування фінансової системи країни, що мало імовірно, то це дає підставу вважати про відсутність зовнішніх фінансових ризиків здійснення проекту.

У таблиці 6.6 наведено основні техніко-економічні показники ефективності впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом на електропоїздах, що курсують у приміському сполученні Південної залізниці.

Таблиця 6.6 – Основні техніко-економічні показники ефективності впровадження системи на приміських електропоїздах

Показники	У діючих умовах експлуатації	В умовах впровадження системи
1	2	3
1 Кількість приміських електропоїздів, од.	54	54
2 Загальна кількість електросекцій, од.	269	269
3 Загальна кількість ТЕД на електропоїздах, од.	1076	1076
4 Потужність одного ТЕД, кВт	200	200
5 Середньорічний пробіг електропоїзда, тис. км	140	140
6 Середні витрати електроенергії на один поїздо-кілометр, кВт-год	457	432
7 Середня кількість ремонтів ТЕД за рік парку електропоїздів, рем.	46	41
8 Одноразові витрати на розроблення і впровадження системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом, тис. грн, у т. ч. з урахуванням зміни вартості грошей у часі, тис. грн	-	783
	-	973
9 Поточні річні витрати на обслуговування системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом на всіх електропоїздах, тис. грн	-	5,0
10 Сукупні поточні витрати на обслуговування системи за життєвий цикл проекту з урахуванням зміни вартості грошей в часі, тис. грн	-	29,9

Продовження таблиці 6.6

1	2	3
11 Життєвий цикл проекту, роки	-	6

12 Поточні експлуатаційні витрати на електроенергію для тяги поїздів за життєвий цикл проекту з урахуванням зміни вартості грошей у часі, тис. грн	560231,4	530718,1
13 Поточні витрати на ремонт ТЕД парку електропоїздів за життєвий цикл проекту з урахуванням зміни вартості грошей у часі, тис. грн	14457,5	13361,0
14 Приріст економічного ефекту від застосування систем автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом на приміських електропоїздах за життєвий цикл проекту з урахуванням зміни вартості грошей у часі, тис. грн	-	29571,6
15 Строк окупності одноразових витрат, роки	-	1
16 Внутрішня норма дохідності проекту (річна дисконтна ставка банків, за якою проект стає неефективним)	-	4,54 (454 %)

6.5 Висновки по розділу 6

1 Передумови вкрай складного фінансово-економічного стану приміського залізничного транспорту склалися за часів СРСР, коли основною його задачею була доставка робочої сили з приміських зон до міст за низькими тарифами, що в умовах планово-директивних методів господарювання було стримуючим фактором зростання частки заробітної плати в собівартості продукції і, відповідно, цін на неї (перш за все продукції військово-промислового комплексу).

2 У наш час в умовах, коли переважають недержавні форми власності на засоби виробництва, збереження статусу «соціальної значущості» за приміським залізничним транспортом посилює негативні тенденції в його роботі, перетворило його на фінансового донора суб'єктів господарської діяльності, що використовують працю мешканців приміських зон. Рівень покриття експлуатаційних витрат доходами від перевезень не перевищує 15 %, що унеможливує не тільки розширене, а і просте відтворення цієї транспортної системи.

3 Оскільки в умовах діючої законодавчої бази приміський залізничний транспорт не в змозі самостійно встановлювати економічно обґрунтовані тарифи на перевезення пасажирів, а також несе фінансові втрати від перевезень пільгового контингенту, то єдиним шляхом зменшення фінансових витрат є впровадження техніко-технологічних рішень, що забезпечує зменшення експлуатаційних витрат, а саме застосування системи автоматичного регулювання та управління тяговим електроприводом.

4 Очікується, що загальна сума економічного ефекту від її розроблення і застосування протягом шести років з урахуванням зміни вартості грошей у часі складе 29571,6 тис. грн, одноразові витрати окупляться у першій половині другого року році експлуатації, а внутрішня норма дохідності заходу складе 4,54 або 454 % річної депозитної ставки банків, за якою проект стає неефективним.

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 рухомих 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 рухомих 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 рухомих 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 та моделі оцінки ступеня іскріння тягових двигунів, які, на відміну від існуючих, оцінюють залежність нульової компоненти спектра $S[0]$ тягового струму за відповідний проміжок часу від кількості іскор N , що дозволяє формувати на виході нейромережевого елемента ступінь приналежності до визначеного

класу комутації зі значенням середньоквадратичної помилки

Функціонування моделі оцінки ступеня іскріння на колекторі тягового двигуна, при порогових значеннях

нульової компоненти спектра: $N'_1 = 50$, $N'_{1\frac{1}{4}} = 100$, $N'_{1\frac{1}{2}} = 250$, $N'_2 = 450$, $N'_3 = 1100$, дозволяє отримати поточне значення ступеня іскріння.

Якщо воно має значення 1 або $1\frac{1}{4}$, то функціонує кореляційна модель, виконуючи аналіз за кожним випадком виникнення поодинокі іскри.

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. Із застосуванням розробленого програмного забезпечення для двигуна типу VEB 1146.9 було виконано розрахунки та зроблено порівняння їх з результатами натурних випробувань при його роботі в генераторному режимі з апріорно встановленою швидкістю обертання без навантаження, що дозволило провести перевірку адекватності моделі. Проведене моделювання на двигунах постійного струму VEB 1146.9 та 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

та розраховує значення температури 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 . 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 ефективного 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 і забезпечує раціональний графік руху й комфортні умови перевезення пасажирів. Встановлено граничні умови функціонування мережі, а саме: якщо задатися чотирма видами завантаження состава (порожній, завантажений на 25 %, завантажений на 50 % і завантажений на 100 %), трьома часами руху состава (уповільнене, номінальне, прискорене) та двома можливими напрямками руху, то необхідно мати не менш 24 ($q_1 = 24$) навчальних векторів, кожний з яких має 13 компонент, тобто $n = 13$. Число розпізнавальних нейронів має бути не менше 24. Розроблена модель має універсальність і може бути розповсюджена до використання на всіх видах рухомого складу.

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 (ЕР-

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 ($a_c = 0,4 \text{ м/с}^2$) – 12,073 (кВт/год), що дозволяє заощаджувати 3,58 % електроенергії при похибці моделювання не більше 3,2 %.

7. Проведено розрахунок техніко-економічної ефективності впровадження методів та моделей прогнозування ефективних параметрів керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу з урахуванням теплових, комутаційних процесів тягових двигунів, 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 електропоїздів, що забезпечує найбільш якісне використання тягових можливостей електродвигунів, гальмівних систем, деталей, вузлів і механізмів візків та інших агрегатів електропоїздів. Крім того зменшується втомлюваність локомотивних бригад, що позитивно впливає на безпеку руху. Зазначені чинники обумовлюють скорочення витрат електроенергії на тягу поїздів, збільшення їх міжремонтного циклу, зниження темпів зносу інших вузлів і агрегатів електропоїздів і, відповідно, скорочення поточних витрат на їх експлуатацію.

Очікується, що загальна сума економічного ефекту від їх застосування на ДП «Південна залізниця», протягом шести років з урахуванням зміни вартості грошей в часі складе 29571,6 тис. грн. При цьому одноразові витрати окупляться у першій половині другого року реалізації проекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вставский, Л.И. Курсом технического прогресса [Текст] / Л.И. Вставский // Железнодорожный транспорт. – 1987. – № 8. – С. 38-41.
2. Васильев, В.В. Автоматизированное ведение электропоезда [Текст] / В.В. Васильев // Локомотив. – 1993. – № 2. – С. 8-9.
3. Кокурин, И.М. Эксплуатационные основы устройств железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / И.М. Кокурин, Л.Ф.

Кондратенко. – М.: Транспорт, 1989. – 184 с.

4. Системы железнодорожной автоматики и телемеханики [Текст] / Ю. А. Кравцов, В.Л. Нестеров, Г.Ф. Лекута [и др.]. – М.: Транспорт, 1996. – 400 с.

5. Панкратов, Л.В. Мониторинг нагрева букс [Текст] / Л.В. Панкратов, С.Н. Чистяков // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 6. – С. 23-24.

6. Волков, В.К. Повышение эксплуатационной надежности тяговых двигателей [Текст] / В.К. Волков, А.Г. Суворов. – М.: Транспорт, 1988. – 128 с.

7. Баранов, Л.А. Учет системы энергоснабжения при проведении тяговых расчетов для поездов метрополитена [Текст] / Л.А. Баранов, В.Г. Сидоренко, М.А. Васильева // Межвуз. сб. науч. трудов. – Самара: СамИИТ, 2001. – № 21. – С. 97-100.

8. Yasunobu, Seiji. A fuzzy control for train operation [Text] / Seiji Yasunobu // Systems and Control. – 1988. – Vol. 32, № 11. – P. 629-636.

9. Харада, Рёнти. Автоведение электропоездов пригородного сообщения на железных дорогах Японии [Текст] / Рёнти Харада, Хироси Татэно // Railway and Electrical Engineering. – 1992. – Vol. 3, № 2. – P. 49-52.

10. Эксплуатационные основы автоматики и телемеханики [Текст] / Вл. В. Сапожников, И.М. Кокурин, В.А. Кононов [и др.]; под ред. Вл.В. Сапожникова. – М.: Маршрут, 2006. – 248 с.

11. Астрахан, В.И. Системы автоведения для управления поездами метрополитена [Текст] / В.И. Астрахан, Ю.А. Барышев. – М.: Транспорт, 1989. – 88 с.

12. Микропроцессорные системы автоведения электроподвижного состава [Текст] / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов; под ред. Л.А. Баранова. – М.: Транспорт, 1990. – 270 с.

13. Бушненко, Ю.В. Микропроцессорная система автоведения пригородного электропоезда [Текст] / Ю.В. Бушненко, Н.В. Никифорова // Новые электронные приборы и устройства: материалы конференции / О-во «Знание» РСФСР. Московский Дом научно-техн. пропаганды им. Ф.Э. Дзержинского. – М., 1991. – С. 106-109.

14. Лисенков, В.М. Двухканальная микропроцессорная система АРС для обеспечения безопасности движения поездов метрополитена [Текст] / В. М. Лисенков, Г.С. Лодыгин, П.Ф. Бестемьянов // Единый ряд систем управления движением поездов: межвуз. сб. науч. трудов. – М.: МИИТ, 1990. – С. 68-78.

15. 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.

16. Masse, J.-P. Le metro le plus moderne du monde [Text] / J.-P. Masse // La Vie du Rail. – 1992. – № 2364. – P. 17-20.

17. Westect ATP goes live in Queensland [Text] // Railway Gazette International. – 1995. – V. 151, № 9. – P. 559.

18. Пясик, М.С. Системы автоматического ведения поезда [Текст] / М.С. Пясик, Е.В. Толстов, И.И. Случак // Промышленные АСУ и контроллеры. –

2001. – № 3. – С. 22-27.

19. Руденко, В.Ф. О проблеме создания системы автоматизированного ведения поезда [Текст] / В.Ф. Руденко // Развитие отечественного локомотивостроения: межвуз. сб. науч. трудов. – С.Пб.: ПГУПС, 2005. – С. 45-51.

20. Автоматизация управления на Римском метрополитене [Текст] // Железнодорожный транспорт. – 1988. – № 10. – С. 76-78.

21. Ковальский, А.Н. Система автоматического управления поездом метрополитена (САУ-М) и ее модернизация [Текст] / А.Н. Ковальский // Сб. науч. трудов. – М.: МИИТ, 1968. – Вып. 276. – С. 3-13.

22. Баранов, Л.А. Структура автоматизированной системы управления движением поездов метрополитена [Текст] / Л.А. Баранов // Автоматизация управления поездами магистральных железных дорог и метрополитенов: межвуз. сб. науч. трудов. – М.: МИИТ, 1989. – Вып. 811. – С. 4-10.

23. 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.

24. Бушненко, Ю.В. Микропроцессорная система автоведения пассажирского поезда [Текст] / Ю.В. Бушненко, Н.Ф. Никифорова, С.В. Свергун // Микропроцессорные системы для испытаний и управления подвижным составом. – М.: ВНИИЖТ, 1992. – С. 36-40.

25. Абрамов, В.М. Повышение надежности и перспективы развития микропроцессорных систем управления и обеспечение безопасности движения поездов [Текст] / В.М. Абрамов, Л.А. Мугинштейн, Б.Д. Никифоров [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – 2002. – № 5. – С. 9-14.

26. Баранов, Л.А. Принципы построения энергооптимальных алгоритмов автоведения грузовых поездов с расположением локомотивной группы в голове состава [Текст] / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Г.Л. Эпштейн // Микропроцессорные системы для испытаний и управления подвижным составом. – М.: ВНИИЖТ, 1992. – С. 14-24.

27. Пясик, М.С. Энергооптимальная система автоведения электровозов, адаптированная к условиям движения [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.С. Пясик. – М.: ВНИИЖТ, 2003. – 22 с.

28. Абрамов, В.М. Поездом управляет автоматика [Текст] / В.М. Абрамов // Локомотив. – 2009. – № 2. – С. 7-8.

29. Гольдштейн, З.А. Микропроцессорная система управления разгоном и стабилизацией скорости дизель-поезда [Текст] / З.Г. Гольдштейн, У.Э. Зитар, А.В. Энгелис // Повышение эффективности устройств электрического транспорта: межвуз. сб. науч. трудов. – Днепропетровск: ДИИТ, 1989. – С. 20-24.

30. Беляев, А.В. Методы реализации алгоритмов управления автономных пассажирских поездов [Текст] / А.В. Беляев, А.Г. Вольвич, Н.Ю. Федорова // Сб. науч. трудов. – М.: Всерос. науч.-исслед. и проект.-конструкт. ин-т электровозостроения, 1999. – Вып. 41. – С. 54-61.

31. Зорин, В.И. Современные системы обеспечения безопасности [Текст] / В.И. Зорин // Железнодорожный транспорт. – 2000. – № 11. – С. 52-54.

32. Системы интервального регулирования движения поездов на перегонах [Текст] / А.Б. Бойник, С.В. Кошевой, С.В. Панченко, В.А. Сотник. – Харьков: УкрГАЗТ, 2005. – 256 с.
33. Володина, О. Надежность устройств ЖАТ – гарантия безопасности движения поездов [Текст] / О. Володина // Автоматика, связь, информатика. – 2010. – № 5. – С. 9-12.
34. Соболев, Ю.В. Путевые преобразователи автоматизированных систем управления железнодорожного транспорта [Текст] / Ю.В. Соболев. – Харьков: ХФИ «Транспорт Украины», 1999. – 196 с.
35. Кулик, П.Д. Тональные рельсовые цепи в системах ЖАТ: построение, регулировка, обслуживание, поиск и устранение неисправностей, повышение эксплуатационной надежности [Текст] / П.Д. Кулик, В.С. Ивакин, А.А. Удовиков. – К.: Изд. дом «Мануфактура», 2004. – 288 с.
36. Махмутов, К.М. Устройства интервального регулирования движения поездов на метрополитене [Текст] / К.М. Махмутов. – М.: Транспорт, 1986. – 350 с.
37. Система безопасности КЛУБ-У [Текст] / С.Ф. Кашин, В.И. Зорин, А.А. Пронин, П.В. Титов // Локомотив. – 2005. – № 9. – С. 30-31.
38. Никифоров, Б.Д. Система автоматического управления движением поездов на железных дорогах России [Текст] / Б.Д. Никифоров, В.И. Головин, Б.И. Мацкевич // Железные дороги мира. – 1994. – № 1. – С. 3-10.
39. Алгоритм функционирования системы УКП СО и увязка с полуавтоматической блокировкой [Текст] / С.А. ЩигOLEв, В.И. Талалаев, В.А. Шевцов, Б.С. Сергеев // Автоматика, связь, информатика. – 1995. – № 5. – С. 10-14.
40. Система устройств контроля состояния свободности перегона методом счета осей [Текст] / С.А. ЩигOLEв, В.И. Талалаев, А.И. Семьянских [и др.] // Автоматика, телемеханика и связь. – 1995. – № 7. – С. 25-27.
41. ЩигOLEв, С.А. Структурная и принципиальная схемы системы УКП СО [Текст] / С.А. ЩигOLEв, В.А. Шевцов, Б.С. Сергеев // Автоматика, связь, информатика. – 1999. – № 6. – С. 12-15.
42. ЩигOLEв, С.А. Аппаратура счетных пунктов системы УКП СО [Текст] / С.А. ЩигOLEв, В.А. Шевцов, Б.С. Сергеев // Автоматика, связь, информатика. – 1999. – № 6. – С. 11-14.
43. Система контроля свободности участков методом счета осей [Текст] / В.И. Антипов, И.Г. Тильк, В.В. Ляной, М.А. Кривда // Автоматика, связь, информатика. – 2000. – № 7. – С. 25-27.
44. Индуктивно-дротовый датчик для выявления транспортного засобу в межах певної ділянки шляху [Текст]: пат. 101096 України МПК В 61 L 1/100 (на винахід) / Бабаєв М.М. Блиндюк В.С., Ананьєва О.М., Гребенюк В.Ю.; заявник і патентовласник УкрДАЗТ. – № а 201111355; заявл. 26.09.2011; опубл. 25.02.2013, Бюл. № 4. – 4 с.
45. Куппер, Д. Электронная система обеспечения безопасности движения поездов EZS 800 [Текст] / Д. Куппер // Железные дороги мира. – 1989. – № 12. – С. 56-60.

46. Watanabe, K. Development of “navigation system” for high-speed train [Text] / K. Watanabe // Japanese Railway Engineering. – 1992. – № 116. – P. 21-24.
47. Locomotive control system and method: пат. 7131614 США, МПК⁷ B61L3/00 / Kusak J. Hendrickson B.C., Kumar A.K., Ballesty D., Hess G. J. (Jr.), Pelkowski S.M.; заявитель и патентообладатель General Electric Co; – № 10/849314; заявл. 19.05.2004; опубл. 07.11.2006; НПК 246/167.
48. Зорин, В.И. Системы обеспечения безопасности движения поездов [Текст] / В.И. Зорин // Автоматика, связь, информатика. – 2009. – № 9. С. 13-14.
49. 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.
50. Волков, Б.А. Обеспечение безопасности скоростных магистралей [Текст] / Б.А. Волков, В.Г. Толмачев, А.А. Васюнина // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 1. – С. 71-72.
51. Принципы построения современных систем автоведения [Текст] / И.К. Юренко, С.П. Микуляк, К.И. Юренко, Д.Е. Притыкин // Транспорт-2008: тр. Всерос. науч.-практ. конф. / Ростов-на-Дону. – Ростов н/Д.: РГУПС, 2008. – Ч. 3. – С. 90-92.
52. ETCS bei europäischen Bahnen [Text] // Elektrische Bahnen. – 2006. – № 1-2. – P. 90.
53. Система ETCS: перспективы и опыт [Текст] / Железные дороги мира. – 2008. – № 4. – С. 63-71.
54. König, N.H. UIC develops standard euro plan interlocking [Text] / N.H. König // International Railway Journal. – 2000. – Vol. 40, № 5. – P. 34-35.
55. New train operation control system with radio and microcomputers [Text] // Techno Jap. – 1989. – Vol. 22, № 9. – P. 49-52.
56. Соколова, В.В. Державне регулювання безпеки та якості транспортних послуг на залізничному транспорті [Текст] // В.В. Соколова, В.Н. Каразіна // Залізничний транспорт України. – 2010. – № 3. – С. 34-39, 75, 77.
57. Бикадоров, В.П. Програма розвитку вітчизняного рухомого складу приміського сполучення [Текст] / В.П. Бикадоров, Є.І. Ломакін, Н.М. Найш // Залізничний транспорт України. – 2003. – № 4. – С. 2-6.
58. Унифицированная система автоведения электропоезда [Текст] / А.Л. Донской, С.В. Свергун, Х.Ю. Буткевич [и др.] // Локомотив. – 2003. – № 9. – С. 18-23.
59. Баранов, Л.А. Модели и методы синтеза микропроцессорных систем автоматического управления скоростью электроподвижного состава с непрерывным управлением тягой [Текст] / Л.А. Баранов // Вестник МИИТа. – 2004. – № 10. – С. 3-16.
60. Микропроцессорная централизованная система автоведения поездов метрополитена [Текст] / Л.А. Баранов, Е.В. Ерофеев, В.М. Максимов, В.Н. Бударин // Микропроцессорные системы и устройства управления ответственными технологическими процессами на транспорте: тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. (15-19 нояб. 1989 г.). – М., 1989. – С. 20-21.

61. Астрахан, В.И. Новая система управления и обеспечения безопасности движения поездов метрополитена [Текст] / В.И. Астрахан // Автоматика, связь, информатика. – 2000. – № 7. – С. 15-17.
62. Onboard diagnosis transforms maintenance [Text] // International Railway Journal. – 2009. – Vol. 49, № 5. – P. 37-38.
63. Нечпай, А.С. Разработка и исследование бортовой системы контроля нагрева букс электропоездов [Текст] / А.С. Нечпай, А.Е. Дубинин // 5 Междунар. науч.-практ. конф. Trans-Mech-Art-Chem (Москва, 2008): труды. – М.: МИИТ, 2008. – С. 169-170.
64. Тишкин, Е.М. Автоматизированный расчет графиков движения поездов метрополитена [Текст] / Е.М. Тишкин, А.Н. Феофилов // Вестник ВНИИЖТ. – 1989. – № 2. – С. 8-9.
65. Василенко, М.Н. Компьютер строит график движения поездов на метрополитене [Текст] / М.Н. Василенко, В.П. Быков, М.П. Лисовский // Автоматика, телемеханика и связь. – 1986. – № 3. – С. 9-10.
66. Ерофеев, Е.В. Автоматизация управления движением поездов на Московском метрополитене [Текст] / Е.В. Ерофеев, Д.А. Зотов, В.М. Максимов // Научно-технологические проблемы транспорта. – 2003. – Т. 4, № 9. – С. 51-56.
67. Ерофеев, Е.В. Система автоведения пассажирского поезда [Текст] / Е.В. Ерофеев, Н.И. Куренков, Я.М. Головичер // Автоматика, телемеханика и связь. – 1976. – № 8. – С. 11-13.
68. Лисенков, В.М. Индуктивная связь с поездами [Текст] / В.М. Лисенков. – М.: Транспорт, 1976. – 112 с.
69. Лисенков, В.М. Теория автоматических систем интервального регулирования [Текст] / В.М. Лисенков. – М.: Транспорт, 1987. – 150 с.
70. Шелухин, В.И. Датчики измерения и контроля устройств железнодорожного транспорта [Текст] / В.И. Шелухин. – М.: Транспорт, 1990. – 120 с.
71. Щавелев, А.А. Алгоритм регулирования времени хода с упреждающим энергооптимальным тяговым расчетом [Текст] / А.А. Щавелев // Вестник МИИТа. – 2003. – № 9. – С. 22-28.
72. Egnot, J.R. Green line ATO builds on tried technology [Text] / J.R. Egnot, G.M. Babicz // Railway Gazette International. – 1993. – Vol. 149, № 3. – P. 177-178.
73. Virtual block control system for railway vehicle: пат. 5398894 США, МКИ⁶ В61L25/00 / Pascoe R.D.; заявитель и патентообладатель Union Switch and Signal Inc. – № 104875; заявл. 10.08.1993; опубл. 21.03.1995; НКИ 246/28 R.
74. Кудряшов, В.А. Передача дискретной информации на железнодорожном транспорте [Текст] / В.А. Кудряшов, Н.Ф. Семенюта. – М.: Издат. группа ЗАО «Вариант», 1999. – 328 с.
75. 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.

76. Азизов, А. Исследование тракта передачи информации систем автоматической регулировки скорости поездов метрополитена [Текст] / А. Азизов, С.К. Стрельцов; Ташкентский ин-т инж. ж.-д. тр-та. – Ташкент, 1991. – 14 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 15.07.91, № 5593 – жд 91.
77. Блиндюк, В.С. Энергоэкономия в силовых электроприводах [Текст] / В.С. Блиндюк // Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины: тези допов. 21-ї міжнар. наук.-практ. конф. (м. Алушта, вересень 2008 р.). – Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – № 4 (Додаток). – С. 28.
78. Telecoms expands its role in railways [Text] // International Railway Journal and Rapid Transit Review. – 1995. – Vol. 35, № 9. – P. 37-38.
79. Климова, Т.В. Особенности построения системы GSM-R ОАО «РЖД» [Текст] / Т.В. Климова // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 12. – С. 25-26.
80. Тараненко, А.Ю. Проектирование цифровой сети технологической радиосвязи [Текст] / А.Ю. Тараненко // Автоматика, связь, информатика. – 2008. – № 12. – С. 27-30.
81. Зорин, В.И. Применение спутниковых навигационных систем GPS/ГЛОНАСС в системах управления и обеспечения безопасности движения поездов [Текст] / В.И. Зорин // ВКСС. Connect! – 2007. – № 2. – С. 102-104.
82. Дыкина, Н.В. Влияние помехозащищенности канала передачи информации на качество управления торможением поездов метрополитена [Текст] / Н.В. Дыкина // Вестник ВНИИЖТ. – 1990. – № 2. – С. 11-14.
83. Бабаев, М.М. Моделирование поездного положения в электродепо метрополитена [Текст] / М.М. Бабаев, О.Ф. Демченко, С.В. Кошевой // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1996. – № 3, 4. – С. 37-40.
84. Verfahren zum Betrieben eines Fahrzeug: заявка 102007010867 Германия, МПК⁸ В61L27/4 (2006.01) / Meur zu Horste Michael; заявитель и патентобладатель Deutsches Zentrum für Luft – und Raumfahrt. – № 102007010867.4; заявл. 02.03.2007; опубл. 11.09.2008.
85. Колпахчян, П.Г. Математическое моделирование процессов в тяговом электроприводе с асинхронными тяговыми двигателями [Текст] / П. Г. Колпахчян // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава: тез. докл. 4 Междунар. науч.-техн. конф. (17-19 июня 2003 г.) – Новочеркасск: Книга, 2003. – С. 68-70.
86. Базилевский, Ф.Ю. Совершенствование законов и алгоритмов управления систем автоматизации подвижного состава [Текст] / Ф.Ю. Базилевский // Электрификация и развитие железнодорожного транспорта России. Традиции, современность, перспективы: тез. докл. Междунар. симпозиума «Eltrans-2001» (Санкт-Петербург, 23-26 окт. 2001 г.). – С.Пб.: Изд-во ПГУПС, 2001. – С. 134-135.

87. Теория электрической тяги [Текст] / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров; под ред. И.П. Исаева. – М.: Транспорт, 1995. – 294 с.

88. Гарг, В.К. Динамика подвижного состава [Текст] / В.К. Гарг, Р.В. Дуккипати. – М.: Транспорт, 1988. – 392 с.

89. Деев, В.В. Тяга поездов [Текст] / В.В. Деев, Г.А. Ильин, Г.С. Афонин; под ред. В.В. Деева. – М.: Транспорт, 1997. – 264 с.

90. Блохин, Е.П. Развитие математических моделей динамики поезда в трудах В.А. Лазаряна и его учеников [Текст] / Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин // Вісник Дніпропетровського нац. ун-ту залізн. тр-ту. – 2009. – № 30. – С. 64-74.

91. Руденко, В.Ф. К вопросу об автоведении состава [Текст] / В.Ф. Руденко // Труды Всесоюзного научно-исследовательского тепловозного института. – М., 1990. – Вып. 71. – С. 3-8.

92. Платонов, Э.Г. Однородная модель динамики неоднородного поезда при произвольном осевом нагружении [Текст] / Э.Г. Платонов, Ю.П. Ворошинин // Транспорт: наука, техника, управление. – М.: ВИНТИ, 1995. – Вып. 5. – С. 21-24.

93. Коган, А.Я. Аналитический метод исследования нестационарных процессов в однородном поезде при произвольном расположении в нем тяговых единиц [Текст] / А.Я. Коган, М.А. Левинзон; ВНИИЖТ. – М., 2001. – 26 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 09.11.2001, № 6337 – жд 2001.

94. Климович, А.В. Аналитический метод решения дифференциального уравнения движения поезда [Текст] / А.В. Климович // Изв. Вузов. Электромеханика. – 2006. – № 2. – С. 52-54.

95. Голубенко, А.Л. Комплексная оценка тягово-динамических качеств локомотива на стадии проектирования [Текст] / А.Л. Голубенко, А.Л. Кашура, А.И. Костюкевич; Восточноукраинский гос. ун-т. – Луганск, 1996. – 13 с. – Деп. в ГПНТБ Украины 21.02.96, № 590 – Ук 96.

96. Ткаченко, В.П. Моделирование кинематического сопротивления движению рельсовых экипажей [Текст] / В.П. Ткаченко, С.Ю. Сапронова; Восточноукраинский гос. ун-т. – Луганск, 1995. – 31 с. – Деп. в ГПНТБ Украины 20.06.95, № 1577 – Ук 95.

97. Конашинский, А.Ю. Аналитическое решение уравнения движения поезда [Текст] / А.Ю. Конашинский // Сб. науч. трудов. – М.: Всерос. науч.-иссл. и проект.-констр. ин-т электровозостроения, 1999. – Вып. 41. – С. 263-274.

98. Исаев, И.П. Основы энергетической теории сцепления колес локомотива с рельсами [Текст] / И.П. Исаев // Транспорт: наука, техника, управление. – М.: ВИНТИ, 1995. – Вып. 5. – С. 25-32.

99. Schreiber, R. Regelung zur optimalen kraft schlußausnutzung bei drehstromlokomotiven auf der basis der steigung der kraftschußkennigen [Text] / R. Schreiber, R. Kögel // Elektrische Bahnen. – 1995. – Vol. 93, № 5. – P. 9.

100. Автоматизация электроподвижного состава [Текст]: учеб. для вузов ж.-д. трансп. / А.Н. Савоськин, Л.А. Баранов, А.В. Плакс, В.П. Феоктистов; под ред. А.Н. Савоськина. – М.: Транспорт, 1990. – 331 с.

101. Устройство для регулирования скорости электроподвижного состава: а.с. 1564014 СССР, МКИ⁴ В60L3/10 / Ефремов А.А., Коваль П.Е., Островский В.С., Савоськин А.Н.; заявитель и патентообладатель Московский ин-т инж. ж.-д. тр-та; – № 4458865/27-11; заявл. 12.07.88; опубл. 15.05.90. – Бюл. 18.
102. Бакланов, А.А. Энергетическая оценка различных видов торможения поезда [Текст] / А.А. Бакланов, А.Ю. Ткачев, Ким Чи Бок // Транспорт: наука, техника, управление. – М.: ВИНТИ, 2005. – Вып. 6. – С. 31-32.
103. Современное тормозное оборудование [Текст] / Железные дороги мира. – 2003. – № 5. – С. 44-48.
104. Бабков, Ю.В. Автоматизация локомотивов [Текст] / Ю.В. Бабков, Ф.Ю. Базилевский, А.В. Грищенко. – М.: Уч.-метод. центр по образованию на ж.-д. тр-те, 2007. – 324 с.
105. Соломин, А.В. Рельсовые тормоза для высокоскоростного подвижного состава [Текст] / А.В. Соломин // Локомотив. – 2003. – № 12. – С. 27.
106. Тонеев, С. Исследование движения поезда при электродинамическом торможении [Текст] / С. Тонеев // Железные дороги мира. – 1989. – № 10. – С. 42-46.
107. Блиндюк, В.С. Особливості застосування тягових двигунів у електроприводах [Текст] / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 134. – С. 199-203.
108. Дудченко, Д.Н. Регулирование тяговых электродвигателей постоянного тока [Текст] / Д.Н. Дудченко // Вестник МИИТа. – 2009. – № 20. – С. 51-54.
109. Мазнев, А.С. Совершенствование системы регулирования возбуждения для электропоездов [Текст] / А.С. Мазнев, А.М. Евстафьев // Вестник транспорта Поволжья. – 2008. – № 2. – С. 4-10.
110. Энергосберегающая система тягового привода электропоезда постоянного тока [Текст] / В.Д. Тулупов, В.Ф. Краснов, В.Ф. Панов, Ю.А. Кирюхин // Сб. науч. трудов. – М.: Московский энергетический ин-т, 1990. – Вып. 238. – С. 7-16.
111. Соне, С. Мероприятия по экономии энергии на железных дорогах Японии [Текст] / С. Соне // Железные дороги мира. – 1983. – № 10. – С. 15-21.
112. Власов, К.П. Теория автоматического управления [Текст] / К.П. Власов. – Харьков: Гуманитарный центр, 2007. – 526 с.
113. Корректирующие цепи в автоматике [Текст]: сб. переводов статей; под ред. М.З. Литвина-Седого. – М.: Изд-во иностр. лит., 1954. – 520 с.
114. Касаткин, А.С. Электротехника [Текст] / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – М.: Высшая школа, 2000. – 542 с.
115. Волков, В. Тяговый электропривод подвижного состава: каким ему быть? [Текст] / В. Волков // Железнодорожный транспорт. – 1995. – № 8. – С. 46-51.
116. Иньков, Ю.М. Системы управления для электроприводов с асинхронными тяговыми двигателями [Текст] / Ю.М. Иньков, Г.А. Федяева,

В.П. Феоктистов // Электротехника. – 2009. – № 4. – С. 8-12.

117. Компьютерная модель электровоза как управляемой электромеханической системы [Текст] / Ю.А. Бахвалов, А.А. Зарифьян, П.Г. Колпахчян [и др.] // Вестник РГУПС. – 2009. – № 3. – С. 22-31, 149-151.

118. Плохов, Е.М. Анализ процессов в тяговом электроприводе электровоза при изменении условий сцепления [Текст] / Е.М. Плохов, П.Г. Колпахчян // Известия вузов. Электротехника. – 1999. – № 4. – С. 69-72.

119. Черномашенцев, В.Г. Преобразователи [Текст] / В.Г. Черномашенцев, В.А. Пацкевич. – Гомель: БелИИЖТ, 1990. – 70 с.

120. Блиндюк, В.С. Моделювання пускових характеристик тед із застосуванням прямого та зворотного комплексного перетворення Фур'є [Текст] / В.С. Блиндюк // Перспективні комп'ютерні, управляючі і телекомунікаційні системи для залізничного транспорту України: тез. докл. 25-й міжнарод. науч.-практ. конф. (г. Алушта, сентябрь 2012 г.). – Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – 2012. – № 4 (Додаток). – С. 98-99.

121. Волынский, Б.А. Электротехника [Текст] / Б.А. Волынский, Е.Н. Зейн, В.Е. Шатерников. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 528.

122. Козаченко, В. Перспективная серия микроконтроллеров фирмы Texas Instruments'240х для систем цифрового управления двигателями [Текст] / В. Козаченко, С. Грибачев // ChipNews. – 1999. – № 9. – С. 7-14.

123. Козаченко, В. Основные тенденции развития встроенных систем управления двигателями и требования к микроконтроллерам [Текст] / В. Козаченко // ChipNews. – 1999. – № 1. – С. 29-35.

124. Принципы управления тяговым электроприводом с асинхронными двигателями, реализованные на экспериментальном поезде метрополитена [Текст] / С.И. Виноградов, А.В. Емсин, И.М. Ляус, Б.Л. Сыркин // Проблемы создания подвижного состава с асинхронными тяговыми двигателями: тез. докл. 2 Международ. науч.-техн. конф. (Рига, 5-7 февр. 1990 г.). – М., 1990. – С. 54.

125. Плис, В.Н. Унифицированная микропроцессорная система управления тяговым электроприводом [Текст] / В.Н. Плис // Сб. науч. трудов. – М.: Всерос. науч.-исслед. и проектно-конструкт. ин-т электровозостроения, 1995. – Вып. 35. – С. 121-125.

126. Бабаев, М.М. Исследование алгоритмов регулирования коэффициента мощности синхронных двигателей [Текст] / М.М. Бабаев, А.П. Зубко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – № 5. – С. 123-126.

127. 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.

128. Карибов, С.И. Перспективы развития тягового электропривода постоянного тока [Текст] / С.И. Карибов // Вестник ВЭЛНИИ. – 2004. – № 2. – С. 102-107.

129. Mattis, W.E. Modelling and minimum energy control of traction motor system [Text] / W.E. Mattis // International Journal of Energy Systems. – 1989. – Vol. 9, № 2. – P. 78-82.
130. Дюбей Гопал, К. Основные принципы устройства электроприводов [Текст] / К. Дюбей Гопал. – М.: Техносфера, 2009. – 480 с.
131. Тимофеев, Д.В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками [Текст] / Д.В. Тимофеев. – М.: Энергия, 1972. – 296 с.
132. Мамошин, Р.Р. Повышение качества энергии на тяговых подстанциях дорог переменного тока [Текст] / Р.Р. Мамошин. – М.: Транспорт, 1973. – 224 с.
133. Дубов, Ю.А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем [Текст] / Ю.А. Дубов, С.И. Травкин, В.Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
134. Захарченко, Д.Д. Тяговые электрические аппараты [Текст] / Д.Д. Захарченко. – М.: Транспорт, 1991. – 248 с.
135. Ерофеев, Е.В. Оптимизация программ движения для систем автоведения поездов с регулятором скорости [Текст] / Е.В. Ерофеев, В.В. Застенкер // Сб. науч. трудов. – М.: МИИТ, 1989. – Вып. 811. – С. 10-13.
136. A system for energy conservation on rail vehicles [Text]: пат. 618 851 Австралия, МКИ⁴ G07C 005/08 / Long A.M., Milroy P.; заявитель и патентообладатель Techsearch, Inc. – № 43322/89; заявл. 28.09.89; опубл. 09.01.92.
137. Стоянов, Д. Принципы на икономическото управление на локомотива [Текст] / Д. Стоянов // Железопътен транспорт. – 1994. – № 10. – С. 4-8.
138. Донской, А.Л. Системы автоведения и регистрации для электровозов пассажирского движения [Текст] / А.Л. Донской, Е.Е. Завьялов // Железнодорожный транспорт. – 2005. – № 9. – С. 9-12.
139. Баранов, Л.А. Расчет экономичных режимов управления поездом в микропроцессорных системах автоведения [Текст] / Л.А. Баранов, Я.М. Головичер, Г.Л. Эпштейн // Вестник ВНИИЖТ. – 1987. – № 6. – С. 12-17.
140. Система автоведения электропоезда [Текст] // Железнодорожный транспорт. – 1991. – № 4. – С. 43.
141. Система автоведения для скоростных электропоездов [Текст] / Т. Окамото, Я. Танака, Х. Мориками [и др.] // Sharyo to denki. – 1993. – Vol. 44, № 3. – P. 8-11.
142. Khmelnitsky, E. On an optimal control problem of train operation [Text] / E. Khmelnitsky // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2000. – Vol. 45, № 7. – P. 1257-1266.
143. Einrichtung und Verfahren zum Einsparen von Fahrenergie bei Schinenfahrzeugen [Текст]: заявка 19946224 Германия, МПК⁷ B61L27/00 / Baier Torsten; заявитель Siemens AG. – № 199462240.0; заявл. 22.09.99; опубл. 26.04.01.
144. Ананьева, Н.Г. Снижение удельного расхода электроэнергии на тягу поездов при внедрении устройств контроля ситуации на

железнодорожном переезде [Текст] / Н.Г. Ананьева // Омский науч. вестн. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2010. – № 1. – С. 158-160, 255.

145. Реализация приоритетной отраслевой программы: опыт дорог [Текст] // Железнодорожный транспорт. – 2004. – № 4. – С. 65-77.

146. Феоктистов, В.П. Возможности энергосбережения при регулировании тяговых электродвигателей электропоездов пригородного сообщения в тормозных режимах [Текст] / В.П. Феоктистов, И.В. Семенов // Вестн. МИИТа. – 2003. – № 8. – С. 39-48.

147. Пристрій автоматичного керування рекуперативним гальмуванням електрорухомого складу постійного струму [Текст]: пат. 70566 Україна, МПК⁷ B60L7/10, B60L7/22 / Устименко Д.В.; заявник і патентовласник Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп., – № 20031211240; заявл. 09.12.03; опубл. 15.10.04.

148. Регистратор параметров движения и автоведения поездов переменного тока [Текст] / В.Д. Никифоров, А.Н. Гуськов, Х.Ю. Буткевич, Д.Ю. Мартынов // Локомотив. – 2005. – № 10. – С. 32-35.

149. Ябко, И.А. Метод расчета энергооптимальных траекторий движения поезда [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / И.А. Ябко. – М.: ВНИИЖТ, 2007. – 25 с.

150. Грицевский, В.П. Прогнозирование в системе автоведения [Текст] / В.П. Грицевский // Микропроцессорные системы для испытаний и управления электроподвижным составом. – М.: ВНИИЖТ, 1992. – С. 64-69.

151. Демченко, Ф.О. Управление движением поезда метрополитена (обзор) Ч. 1. Задача совершенствования технологии управления электропоездом метрополитена [Текст] / Ф.О. Демченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2002. – № 3. – С. 26-30.

152. Пантелеев, А.В. Методы оптимизации [Текст] / А.В. Пантелеев, Т.А. Летова. – М.: Высшая школа, 2002. – 544 с.

153. Дегтярев, Ю.И. Методы оптимизации [Текст] / Ю.И. Дегтярев. – М.: Сов. Радио, 1980. – 272 с.

154. Математическая теория оптимальных процессов [Текст] / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрлидзе, Е.Ф. Мищенко. – М.: Наука, 1976. – 392 с.

155. Беллман, Р. Динамическое программирование [Текст] / Р. Беллман. – М.: Иностранная литература, 1960. – 400 с.

156. Пудовиков, О.Е. Система автоматического регулирования скорости перспективного электропоезда [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / О.Е. Пудовиков. – М.: Московский гос. ун-т путей сообщ., 2000. – 23 с.

157. Chang, C.S. Differential evolution based tuning of fuzzy automatic train operation for mass rapid transit system [Text] / C.S. Chang, D.Y. Xu // IEE Proceedings Electric Power Applications. – 2000. – Vol. 147, № 3. – P. 206-212.

158. Mei, T.X. LOG and GA solutions for active steering of railway vehicles [Text] / T.X. Mei, R.M. Goodall // IEE Proceedings Control Theory @ Applications. – 2000. – Vol. 147, № 1. – P. 111-117.

159. Сейдж, Э.П. Оптимальное управление системами [Текст] / Э.П. Сейдж, Ч.С. Уайт, III. – М.: Радио и связь, 1982. – 392 с.

160. Круглов, В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети [Текст] / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Годунов. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.
161. 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.
162. Головкин, В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение [Текст] / В.А. Головкин. – М.: ИПРЖР, 2002. – 256 с.
163. Сверхбольшие интегральные схемы и современная обработка сигналов [Текст]; под ред. С. Гуна, Х. Уайтхауса, Т. Кайлата. – М.: Радио и связь, 1989. – 472 с.
164. Реализация цифрового скоростемера системы АРС на однокристальном микроконтроллере [Текст] / В.Б. Евдокимов, В.С. Коновалов, В.Н. Филиппович, А.Н. Шраменко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – № 1. – С. 50-53.
165. Kung, H.T. Why systolic architectures? [Text] / H.T. Kung // Computer . – 1982. – Vol. 15, № 1. – P. 37-46.
166. Кухарев, Г.А. Системные процессоры для обработки сигналов [Текст] / Г.А. Кухарев, А.Ю. Тропченко, В.П. Шмерко. – Минск: Беларусь, 1988. – 128 с.
167. Система управления движением электропоезда [Текст]: пат. 2213669 Россия, МПК⁷ В 60L 15/40, В 61L 3/20 / Рабинович М.Д., Бушненко Ю.В., Буткевич Х.Ю. [и др.]; заявитель и патентообладатель ООО «Желдорконсалтинг». – № 2002122430/28; заявл. 21.08.02; опубл. 10.10.03.
168. Способ выбора наиболее экономичного режима движения поезда на заданном участке пути [Текст]: пат. 2237589 Россия, МПК⁷ В 61L 27/00 / Климович А.В., Авилов В.Д.; заявитель и патентообладатель Омский гос. ун-т путей сообщ. – № 2003121717/11; заявл. 14.07.03; опубл. 10.10.04.
169. Цыпкин, Я.З. Основы информационной теории идентификации [Текст] / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1984. – 320 с.
170. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя [Текст] / Л.Льюнг. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
171. Бестемьянов, П.Ф. Алгоритм управления торможением поезда в системе автоматического регулирования скорости движения поездов метрополитена [Текст] / П.Ф. Бестемьянов // Сб. науч. трудов. – М.: МИИТ, 1990. – Вып. 838. – С. 53-58.
172. Милич, А.М. Выбор управления электропоездом со ступенчатым управлением силой тяги при поддержании постоянной скорости [Текст] / А. М. Милич // Сб. науч. трудов. – М.: МИИТ, 1989. – Вып. 811. – С. 71-75.
173. Procédé et dispositif pour la régulation de la puissance demandée par une motrice de véhicule ferroviaire [Текст]: заявка 2838685 Франция, МПК⁷ 60 15/10, 60 3/00. – № 0204933; заявл. 19.04.02; опубл. 24.10.03.
174. Савоськин, А.Н. Система автоматического управления скоростью движения электроподвижного состава [Текст] / А.Н. Савоськин, В.С.

Островский, О.Е. Пудовиков // Подвижной состав XXI века (идеи, требования, проекты: тез. докл. науч.-техн. конф. (Санкт-Петербург, 27-29 мая, 1999). – С.Пб.: Б.и., 1999. – С. 56.

175. Демченко, Ф.О. Программная модель АРС метрополитена [Текст] / Ф.О. Демченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2000. – № 3. – С. 111-112.

176. Васильева, М.А. Энергооптимальные режимы управления движением поезда метрополитена [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / М.А. Васильева. – М.: Московский гос. ун-т путей сообщ., 2003. – 24 с.

177. Выбор энергетически оптимальных режимов движения поездов [Текст] / Е.П. Блохин, А.Н. Пшинько, Г.В. Евдомаха [и др.] // Залізничний транспорт України. – 2001. – № 6. – С. 19-22, 53, 54.

178. Lancien L. Astrée, le contrôle-commande ferroviaire du XXI^e siècle [Text] / L. Lancien // Arts et métiers magazine. – 1995. – № 195. – P. 38-41.

179. Елсуков, В.А. Опыт эксплуатации комплексной системы автоматического управления поездами [Текст] / В.А. Елсуков, Н.И. Фирсов // Вестник ВНИИЖТ. – 1983. – № 1. – С. 10-13.

180. Головичер, Я.М. Использование принципа максимума для расчета оптимальных режимов вождения поездов [Текст] / Я.М. Головичер // Микропроцессорные системы и устройства управления ответственными технологическими процессами на транспорте: тез. докл. Всесоюзной науч.-техн. конф. (15-19 нояб., 1989 г.). – М., 1989. – С. 24-25.

181. Hill, R.J. Electric railway traction. Part 4. Signalling and interlocking [Text] / R.J. Hill // Power Engineering Journal. – 1995. – Vol. 9, № 4. – P. 201-206.

182. Ерохин, А.Ю. Методика обоснования требований к измерителям параметров движения поездов по точности и надежности [Текст] / А.Ю. Ерохин; Московский ин-т инж. ж. д. тр-та. – М., 1991. – 11 с. – Деп. в ЦНИИТЭИ МПС 31.10.91, № 5643-жд.

183. Устройство корректировки линейной координаты нахождения поезда [Текст]: пат. 2290335 Россия, МПК⁷ В 61 L 25/00 / Кравцов Ю.А., Никифоров Б.Д., Правдолюбов А.Э., Чепелев Д.Н.; заявитель и патентообладатель ООО «Желдорконсалтинг». – № 2005119394/11; заявл. 22.06.05; опубл. 27.12.06.

184. Global axle counter experience [Text] // International Railway Journal. – 2002. – Vol. 42, № 6. – P. 6.

185. Шелухин, О.И. Радиосистемы ближнего действия [Текст] / О.И. Шелухин. – М.: Радио и связь, 1989. – 238 с.

186. Использование радара для измерения пройденных пути и скорости [Текст] // Железные дороги мира. – 2000. – № 10. – С. 51-56.

187. Орлов, А.В. Совершенствование методов измерения параметров движения поездов [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.В. Орлов. – М.: Российский гос. техн. ун-т путей сообщ., 2006. – 28 с.

188. Способ и устройство определения скорости рельсового транспортного средства [Текст]: пат. 2293671 Россия, МПК⁷ В 60 Т 8/00 / Никонов А.М., Глущенко Я.В., Пузанков В.Д., Гинзбург Б.И.; заявитель и

патентообладатель ОАО ВНИИ транспортного машиностроения. – № 2002117332/11; заявл. 28.06.02; опубл. 20.02.07.

189. Эталонные координатные модели пути (ЭКМП) – новое направление мониторинга пути и навигации железнодорожного транспорта [Текст] / С.И. Матвеев, Д.С. Манойло, С.А. Матвеев, В.А. Коугия // Геопространственные технологии и сферы их применения: тез. докл. 3 Междунар. науч.-практ. конф. (Москва, 14-15 марта, 2007). – М.: Гром, 2007. – С. 61-63.

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

191. Бабичков, А.М. Тяга поездов и тяговые расчеты [Текст] / А.М. Бабичков, П.А. Гурский, А.П. Новиков. – М.: Транспорт, 1971 – 280 с.

192. Neue Teilstrecke der vollautomatischen Metro in Paris in Betrieb [Text] // Signal+Draht. – 2004. – Vol. 96, № 3. – P. 42.

193. SIEMENS-Un VAL olimpique [Text] // La viedu rail. – 2005. – № 3007. – P. 31.

194. Hohe Verfügbarkeit der fahrerlosen Canada-Line [Text] // Signal+ Draht. – 2010. – Vol. 102. – № 1-2. – P. 45.

195. Singapore orders driverless cars [Text] // International Railway Journal. – 2008. – Vol. 48, № 12. – P. 16.

196. Бирюков, И.В. Тяговые передачи электроподвижного состава железных дорог [Текст] / И.В. Бирюков, А.И. Беляев, Е.К. Рыбников. – М.: Транспорт, 1986. – 256 с.

197. Укрзалізниця. Загальна інформація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.uz.gov.ua/about/general_information/.

198. Програма оновлення рухомого складу на 2008-2020 pp. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zdsim.com/forum/lofiversion/index.php?t4539-450.html>.

199. Электропоезд ЕПЛ2Т [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.luganskteplovoz.com/ProdOsnProduct/OnlyOsnProduct/26>.

200. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов [Текст] / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, С.Ю. Леонов. – Харьков: ХФИ "Транспорт Украины", 2003. – 248 с.

201. Перспективы и проблемы внедрения асинхронного электропривода на тепловозах [Текст] / В.И. Носков, В.С. Марченко, Г.А. Михневич [и др.] // Сб. науч. Трудов НИИ завод «Электротяжмаш» и МЭТП. – 1989. – Вып. 1. – С. 40-44.

202. Адаптивный контроль отклонений в системах управления локомотивов с помощью нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, В.И. Носков, М.В. Липчанский // Вісник НТУ «ХП»: зб. наук. праць. Тематичний випуск: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП»

. – 2002. – № 18. – С. 45 – 51.

203. Носков, В.И. Синтез системы управления тяговым асинхронным приводом [Текст] / В.И. Носков // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. – № 4. – С. 31-33.

204. Носков, В.И. Задача синтеза системы управления движением транспортного средства [Текст] / В.И. Носков // Комунальне господарство міст. – 2004. – № 55. – С. 166 - 171.

205. Гусевський, Ю.І. Наукові основи створення ефективних систем тягового електроприводу з тиристорними перетворювачами для автономних локомотивів [Текст]: автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 05.22.07 / Ю.І. Гусевський. – Харків: УкрДАЗТ, 1999. – 38 с.

206. Гусевский, Ю.И. К вопросу о генераторном торможении асинхронного тягового двигателя при ограничении по магнитному потоку [Текст] / Ю.И. Гусевский, В.И. Иваненко, А.П. Пимонов [и др.] // Электромашиностроение и автоматизация промышленных предприятий: вестник ХПИ. – Харьков: ХПИ, 1983. – № 206 (вып. 8). – С. 29-31.

207. Гусевский, Ю.И. Перспективы использования двухфазных асинхронных двигателей в тяговом электроприводе [Текст] / Ю.И. Гусевский, В.Н. Иваненко, С.И. Рогачев, // Вестник Харьковского политехнического института. – 1987. – Вып. 247. – С. 5-7.

208. Гусевский, Ю.И. Исследование устойчивости системы регулирования генератора энергоснабжения тепловоза ТЭ120 [Текст] / Ю.И. Гусевский, В.Н. Иванова // ЭП "Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование. – 1982. – № 2 (80). – С. 4-6.

209. Гусевский, Ю.И. Система энергоснабжения собственных нужд тепловоза ТЭ120 [Текст] / Ю.И. Гусевский, В.Н. Иванова, С.А. Храменков // Исследование электрических передач: труды ВНИТИ. – Коломна, 1977. – Вып. 45. – С. 152-156.

210. Гусевский, Ю.И. Измерение магнитного потока тягового асинхронного электродвигателя [Текст] / Ю.И. Гусевский, В.И. Носков, М.В. Мажинский, В.С. Калмыков // ЭП "Тяговое и подъемно-транспортное электрооборудование". – 1979. – № 2 (62). – С. 14-17.

211. Панасюк, А.М. Оптимальное частотное управление асинхронным двигателем с учетом электромагнитных процессов в нормированных переменных [Текст] / А.М. Панасюк, А.С. Шмаков // Автоматика и вычислительная техника: респ. межвед. сб. – Минск: Высшая школа, 1986. – Вып. 15. – С. 28-30.

212. Политыко, Э.Д. Новый метод расчета оптимального частотного управления асинхронным электроприводом с учетом электромагнитных процессов [Текст] / Э.Д. Политыко, А.И. Панасюк, В.И. Панасюк // Электромеханика. – 1981. – № 4. – С. 435-438.

213. Кулагін, Д.О. Підвищення ефективності роботи тягової електропередачі дизель-поїздів ДЕЛ-02 [Текст]: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Д.О. Кулагін. – К.: ДП ДНДЦ УЗ, 2011. – 18 с.

214. Кулагін, Д.О. Двухзонне квазівекторне регулювання швидкості обертання тягового двигуна дизель-поїзда ДЕЛ-02 [Текст] / Д.О. Кулагін, О.С. Качур, П.Д. Андрієнко // Вісник КДУ ім. М. Острогадського. – 2010. – № 4 (63). – С. 15-18.

215. Кулагін, Д.О. Моделювання квазівекторної системи частотно-регульованого електроприводу асинхронного двигуна без давача швидкості [Текст] / Д.О. Кулагін, О.С. Качур, П.Д. Андрієнко // Вісник НТУ «ХП». – 2008. – № 30. – С. 168-170.

216. Кулагін, Д.О. Моделювання квазівекторної системи частотно-регульованого електроприводу асинхронного двигуна без давача швидкості [Текст] / Д.О. Кулагін, О.С. Качур, П.Д. Андрієнко // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: материалы науч.-техн. конф. – 2010. – С. 408-409.

217. Кулагін, Д.О. Розробка моделі модернізованого частотно-керованого тягового електроприводу зі змінним алгоритмом керування дизель-потяга ДЕЛ-02 [Текст] / Д.О. Кулагін, О.С. Качур, П.Д. Андрієнко // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. – № 1. – С. 30-34.

218. Синчук, О.Н. Синергетическая система асинхронного электропривода контактно-аккумуляторного двухосного электровоза [Текст] / О.Н. Синчук, Д.А. Шокарев, И.О. Синчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи: наук.-техн. зб. — Кременчуг. — 2011. — № 3 (12).

219. Синчук, О.Н. Импульсные системы управления и защиты на рудничном электровозном транспорте [Текст] / О.Н. Синчук, В.В. Чумак, О.В. Егоров. – М., 1990. – 161 с.

220. Синчук, О.Н. Особенности переходных электромагнитных процессов в тяговом электроприводе с импульсным преобразователем напряжения рудничных аккумуляторных электровозов [Текст] / О.Н. Синчук, О.А. Удовенко, В.В. Чумак // Электротехника. – 2004. – № 6. – С. 58 -60.

221. Системы управления рудничным электровозным транспортом [Текст] / О.Н. Синчук, Т.М. Беридзе, Э.С. Гузов [и др.]. – М.: Недра, 1993. – 255 с.

222. Гетьман, Г.К. Моделирование ограничений области допустимых управлений уравнения движения поезда в задачах тягового обеспечения [Текст] / Г.К. Гетьман // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – 1999. Вип. 85. – С. 44-51.

223. Гетьман, Г.К. Математическая модель поезда для производства тяговых расчетов в задачах выбора параметров тяговых средств [Текст] / Г.К. Гетьман // Транспорт: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 1999. – Вип. 1. – С. 75-79.

224. Босов, А.А. Векторная оптимизация в задачах тяговых расчетов [Текст] / А.А. Босов, Г.К. Гетьман // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ, 1999. – Вип. 73. – С. 23-27.

225. Гетьман, Г.К. Применение методов векторной оптимизации для решения задач тяговых расчетов [Текст] / Г.К. Гетьман // Вісник Харківського державного політехнічного університету. – Харків: ХДПУ,

1999. – Вип. 62. – С. 12-19.

226. Гетьман, Г.К. Наукові основи визначення ряду потужностей вантажних електровозів для залізниць України [Текст]: автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 05.22.09 / Г.К. Гетьман. – Дніпропетровськ: ДНУЗТ, 2001. – 36 с.

227. Боднар, Б.Є. Теорія та конструкція локомотивів. Екіпажна частина [Текст]: підручн. для ВНЗ / Б.Є. Боднар, Є.Г. Нечаєв, Д.В. Бобир. – Дніпропетровськ: ПП «Ліра ЛТД», 2009. – 283 с.

228. Боднар, Б.Є. Теорія та конструкція локомотивів. Допоміжні системи та устаткування [Текст]: підручн. для ВНЗ / Б.Є. Боднар, Є.Г. Нечаєв, Д.В. Бобир. – Дніпропетровськ: ПП «Ліра ЛТД», 2010 – 372 с.

229. Боднар, Б.Є. Теорія та конструкція локомотивів. Основи проектування [Текст]: підручн. для ВНЗ / Б.Є. Боднар, Є.Г. Нечаєв, Д.В. Бобир. – Дніпропетровськ: ПП «Ліра ЛТД», 2010. – 358 с.

230. Феоктистов, В.П. Информационно-планирующая система службы тяги. Германия [Текст]; пер. с нем. / В.П. Феоктистов // РЖ Техническая эксплуатация подвижного состава и тяга поездов. – 1997. – 1В79.

231. Феоктистов, В.П. Диагностическое бортовое оборудование для тепловозов США [Текст] / В.П. Феоктистов // РЖ Техническая эксплуатация подвижного состава и тяга поездов. – 1997. – 4В32.

232. Феоктистов, В.П. Техническое диагностирование электронного оборудования транспортных средств [Текст] / В.П. Феоктистов, И.К. Лакин // Транспорт: наука, техника, управление. – 1997. – № 11. – С. 5-19.

233. Феоктистов, В.П. / Использование вычислительной техники в локомотивных депо [Текст] / В.П. Феоктистов, И.К. Лакин, В.В. Семченко, Н. Г. Шабалин // Ж.-д. транспорт. Сер. Локомотивы и локомотивное хозяйство. Ремонт локомотивов. – М.: ОИ/ЦНИИТЭИ МПС. – 1997. – Вып. 3. – С. 1-35.

234. Феоктистов, В.П. Бортовая система технической диагностики для электропоездов. Германия. [Текст]; пер. с нем. / В.П. Феоктистов // РЖ Техническая эксплуатация подвижного состава и тяга поездов. – 1996. – 10В32.

235. Феоктистов, В.П. Стенд для испытаний тяговых редукторов подвижного состава в депо. Великобритания. [Текст]; пер. с англ. / В.П. Феоктистов // РЖ Техническая эксплуатация подвижного состава и тяга поездов. – 1996. – 10В14.

236. Жирков, А.И. Совершенствование алгоритмов управления электровозами переменного тока с коллекторными тяговыми двигателями [Текст] / А.И. Жирков, А.И. Плис // Вісник СНУ ім. В. Даля. – № 4 (158). – Ч. 1. – 2011. – С. 207-211.

237. Басов, Г.Г. Развитие научных основ створення та контролю технічного стану нового моторвагонного рухомого складу [Текст]: автореф. ... дис. д-ра техн. наук: 05.22.07 / Г.Г. Басов. – Харків: УкрДАЗТ. 2008. – 39 с.

238. Басов, Г.Г. Разработка типажа современного моторвагонного подвижного состава для украинских железных дорог [Текст] / Г.Г. Басов, К.П. Мищенко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2003. – № 48. – С. 90-91.

239. Басов, Г.Г. Розвиток електричного моторвагонного рухомого складу [Текст] / Г.Г. Басов, С.І. Яцько. – Харків: «Апекс+», 2005. – Ч. 2. – 248 с.
240. Басов, Г.Г. Модернизация моторных тележек электропоездов ЭПЛ2Т и ЭПЛ9Т [Текст] / Г.Г. Басов, В.И. Нестеренко, Е.М. Богопольський // Зб. наук. праць. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2003. – С. 52-54.
241. Далека, В.Х. Практикум з технічної експлуатації міського електричного транспорту [Текст] / В.Х. Далека, В.І. Коваленко, В.Б. Будниченко, М.В. Хворост. – Харків: ХДАМГ, 2007. – 171 с.
242. Хворост, Н.В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития [Текст] / Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Електротехніка та електромеханіка. – 2003. – № 4. – С. 27-38.
243. Сорин, Л.Н. Автоматизованные системы управления для железнодорожного транспорта [Текст] / Л.Н. Сорин. – Вісник СНУ ім. В. Даля. – № 4 (158). – 2011. – Ч. 1. – С. 205-207.
244. Розенфельд, В.Е. Аналитический метод проведения на ЭЦВМ тягового расчета при заданном времени хода и минимальном расходе электроэнергии [Текст] / В.Е. Розенфельд, Д.А. Палей // Вестник ВНИИЖТ. – 1974. – № 1. – С. 10-15.
245. Гуткин, Л.В. Электропоезд ЭР200 [Текст] / Л.В. Гуткин, Ю.Н. Дымант, И.А. Иванов. – М.: Транспорт, 1981. – 192 с.
246. Лисунов, В.Н. Контроль температуры оборудования электровоза [Текст] / В.Н. Лисунов, В.П.Смирнов // Ползуновский вестник. – 2005. – № 2. – С. 222-226.
247. Дмитриенко, В.Д. Проблемы оптимизации управления тяговым асинхронным приводом украинских дизель-поездов [Текст] / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, М.В. Липчанский // Моделювання та інформаційні технології. – 2004. – Вип. 26. С. 48-54.
248. Александров, Є.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами [Текст]: підручник / Є.Є. Александров, Є.П. Козлов, Б.І. Кузнецов. – Т.1. Теорія автоматичного керування. – Харків: НТУ "ХП", 2002. – 490 с.
249. Носков, В.И. Оптимизационная модель для синтеза терминальных управлений движением электропоезда [Текст] / В.И. Носков, Ю.Н. Колыбин, М.В. Липчанский // Вісник НТУ "ХП". Автоматика та приладобудування: тематичний вип. – Харків: НТУ"ХП". – 2001. – № 4. – С. 198–202.
250. Математическое моделирование динамики электровозов [Текст] / А.Г. Микитенко, Е.М. Плохов, А.А. Зафирьян, Б.И. Хоменко. – М.: Высш. шк., 1998. – 273 с.
251. Дмитриенко, В.Д. Математическое моделирование и оптимизация системы управления тяговым электроприводом [Текст] / В.Д. Дмитриенко, В. И. Носков, М.В. Липчанский // Системи обробки інформації: зб. наук. праць. – Харків: ХВУ. – 2004. – Вип. 11(39). – С. 55–62.
252. Краснощеченко, В.И. Нелинейные системы: геометрический метод анализа и синтеза [Текст] / В.И. Краснощеченко, А.П. Грищенко. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 520 с.

253. Дмитриенко, В.Д. Синтез оптимальных законов управления тяговым электроприводом методами дифференциальной геометрии и принципа максимума [Текст] / В.Д. Дмитриенко, А.Ю. Заковоротный // Системи обробки інформації. – 2009. – Вип. 4 (78). – С. 42-51.
254. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст]: учебник; под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – Т. 5. Методы современной теории управления. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 784 с
255. Ким Д.П. Теория автоматического управления [Текст]: учеб. пособие / Д.П. Ким. – Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. – М.: Физматлит, 2004. – 464 с.
256. Цукало П.В., Электропоезда ЭР2, ЭР2Р [Текст] / П.В. Цукало, Н.Г. Ерошкин. – М.: Транспорт, 1986. – 359 с.
257. Mayer, L. Valutazione della fattibilita di una sistema di trazione elettrica a 12 kV corrente continua [Text] / L. Mayer, O. Ventura // Ingegneria Ferroviaria. – 1988. – № 5. – P. 18-36
258. Pore, J. Automatic Train Operation [Text] / J. Pore // Signal und Draht. – 2010. – № 7-8. – P. 36-40
259. Laska, B. Traction systems for El.Mult. units motor cars with DC 3kV line voltage [Text] / B. Laska // 3-rd. Int. conf. Drives and supply systems for modern electric traction. – Warsaw. – 1997. – P. 23-38
260. Ландау, Л.Д. Теоретическая физика [Текст] / Л.Д. Ландау, Е.М. Лившиц. – Т.1. Механика. – М.: Наука, 1988. – 215 с.
261. Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам [Текст]; под ред. А.И. Тищенко. – М.: Транспорт, – 1976. – 432 с.
262. Иванов, В.А. Математические основы теории автоматического регулирования [Текст]: учеб. пособ. для вузов / В.А. Иванов, В.С. Медведев, Б.К. Чемоданов; под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Высш. шк. – 1971. – 808 с.
263. Вегнер, О.Г. Теория и практика коммутации машин постоянного тока [Текст] / О.Г. Вегнер. – М.: Госэнергоиздат, 1961. – 272 с.
264. Оптимальная коммутация машин постоянного тока [Текст] / М.Ф. Карасев, В.П. Беляев, В.Н.Козлов [и др.]; под общ. ред. М.Ф. Карасева. – М.: Транспорт, 1967. – 180 с.
265. Толкунов, В.П. Теория и практика коммутации машин постоянного тока [Текст] / В.П. Толкунов. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
266. Девликамов, Р.М. Новые элементы теории токосъема с коллекторов электродвигателей и рекомендации по их использованию на практике [Текст] / Р.М. Девликамов. – М.: ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011. – 224 с.
267. 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.
268. 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.

269. Блиндюк, В.С. Синтез оптимального приемача іскрової компоненти струму тягового двигуна [Текст] / В.С. Блиндюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2013.– № 1. – С. 82-88.

270. Давиденко, М.Г. Математические модели тока коммутации при наличии короткозамкнутых витков в коммутируемой секции якоря [Текст] / М.Г. Давиденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – № 1. – С. 48-57.

271. Смирнов, В.И. Курс высшей математики [Текст] / В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1974. – Т. 2.– 656 с.

272. Тихонов, А.Н. Дифференциальные уравнения [Текст] / А.Н. Тихонов, А.Б. Васильева, А.Г. Свешников. – М.: Наука, 1980. – 232 с.

273. Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Электрические машины постоянного тока [Текст] / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – С.Пб.: Питер, 2008. – 320 с.

274. Лозанский, Э.Д. Теория искры [Текст] / Э.Д. Лозанский, О.Б. Фирсов. – М.: Атомиздат, 1975. – 272 с.

275. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда [Текст] / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1992. – 536 с.

276. УЗО – устройства защитного отключения [Текст] / сост. Н.Д. Душкин. – М.: Энергосервис, 2003. – 232 с.

277. Балданов, Б.Б. Два типа токовых пульсаций слаботокового искрового разряда в неоднородном электрическом поле [Текст] / Б.Б. Балданов // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, вып. 4. – С. 135-137.

278. Основи теорії кіл [Текст] / Ю.О. Коваль, Л.В. Гринченко, І.О. Милютченко, О.І. Рибін. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – Ч. 1. – 492 с.

279. Лосев, А.К. Теория линейных электрических цепей [Текст] / А.К. Лосев. – М.: Высш. шк., 1987. – 512 с.

280. Електротехніка та електромеханіка систем залізничної автоматики [Текст] / М.М. Бабаєв, М.Г. Давиденко, Г.І. Загарій [та ін.]. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 608 с.

281. Радіотехніка. Енциклопедичний навчальний довідник [Текст] / В.Т. Белінський, Г.І. Васюк, Вал. С. Вунтесмері [та ін.]; за ред. Ю.Л. Мазора, Є.А. Мачуського, В.І. Правди. – К.: Вища шк., 1999. – 838 с.

282. Сергиенко, А.Б. Цифровая обработка сигналов [Текст] / А.Б. Сергиенко. – С.Пб.: Питер, 2003. – 604 с.

283. Двайт, Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы [Текст] / Г.Б. Двайт. – М.: Наука, 1983. – 176 с.

284. Гемке, Р.Г. Неисправности электрических машин [Текст] / Р.Г. Гемке. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 336 с.

285. Фалькович, С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем [Текст] / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.

286. Батаєв, О.П. Теорія електричного зв'язку [Текст] / О.П. Батаєв, Н.А. Корольова, І.В. Ковтун. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – 630 с.

287. Пугачев, В.С. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст] / В.С. Пугачев. – М.: Наука, 1979. – 496 с.

288. Кендэл, М. Временные ряды [Текст] / М. Кендэл. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 200 с.

289. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст] / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 2003. – 462 с.

290. Харкевич, А.А. Основы радиотехники [Текст] / А.А. Харкевич. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 512 с.

291. Брускин, Д.Э. Электрические машины и микромашины [Текст]: учеб. для электротехн. спец. вузов / Д.Э. Брускин, А.Е. Зорохович, В.С. Хвостов. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 528 с.

292. Давиденко, М.Г. Обобщенная математическая модель тока коммутации при наличии короткозамкнутых витков в коммутируемой секции якоря [Текст] / М.Г. Давиденко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – № 5. – С. 14-19.

293. Руководство по устройству электропоездов серии ЭТ2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М [Текст]; под ред. Д.В. Пегова, П.В. Бурцева, В.Е. Андреева. – М.: Центр Коммерческих Разработок, – 2003. – 184 с.

294. Тамм, И.Е. Основы теории электричества [Текст] / И.Е. Тамм. – М.: Наука, 1976. – 616 с.

295. Красносельский, М.А. Системы с гистерезисом [Текст] / М.А. Красносельский, А.В. Покровский. – М.: Наука, Глав. ред. физико-математической лит-ры, 1983. – 272 с.

296. Лукичев, А.А. Простая математическая модель петли гистерезиса для нелинейных материалов [Текст] / А.А. Лукичев, В.В. Ильина // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2011. – Т. 13, № 4. – С. 39-44.

297. Rostislav V. Lapshin Analytical model for the approximation of hysteresis loop and its application to the scanning tunneling microscope [Text] / Rostislav V. Lapshin // American Institute of Physics, – Rev. Sci. Instrum. 66 (9), September, – 1995. – Vol. 4718-4730.

298. Гоноровский, И.С. Радиотехнические цепи и сигналы [Текст]: учебник для вузов / И.С. Гоноровский. – 2-е изд., пер. и доп. – М.: Советское радио, 1971. – 672 с.

299. 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.

300. 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.

301. Блиндюк, В.С. Дискретне динамічне моделювання електричних машин тягового рухомого складу [Текст] / В.С. Блиндюк // Безопасность и электромагнитная совместимость на железнодорожном транспорте: тез. V

Международ. науч.-практ. конф. – Днепропетровск: ДНУЖТ им. акад. В. Лазаряна, 2012. – С. 12.

302. Проектирование тяговых электрических машин [Текст]; под ред. М.Д. Находкина. – М.: Транспорт, 1976. – 624 с.

303. 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.

304. Алексеев, А.Е. Тяговые электрические машины и преобразователи [Текст] / А.Е. Алексеев. – Л.: Энергия, 1987. – 432 с.

305. Исмаилов, Ш.К. Тепловое состояние тяговых и вспомогательных электрических машин электровозов постоянного и переменного тока [Текст] / Ш.К. Исмаилов. – Омск, 2001. – 75 с.

306. Электровоз ВЛ10 [Текст]: руководство по эксплуатации; под ред. Н.И. Кикнадзе. – М.: Транспорт, 1975. – 326 с.

307. Платов, Н.А. Разработка универсальной модели для тепловых расчетов тяговых электродвигателей локомотивов [Текст]: автореф. ... дис. канд. техн. наук: 05.14.01 / Н.А. Платов. – М.: МИИТ, 2009. – 24 с.

308. Платов, Н.А. Применение блочной структуры для разработки эквивалентной тепловой схемы замещения главного и добавочного полюсов тягового электродвигателя [Текст] / Н.А. Платов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2008. – № 3. – С. 27 – 31.

309. Минаев, Б.Н. Расчет температурного поля электромашины [Текст] / Б.Н. Минаев, Н.А. Платов // Мир транспорта. – 2009. – № 1. – С. 42 – 49.

310. Грищенко, М.А. Повышение остаточного ресурса тяговых электродвигателей за счет ограничения максимальной температуры обмоток [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / М.А. Грищенко. – С.Пб., 2010. – 148 с.

311. Грищенко, М.А. Анализ теплового состояния обмотки якоря тягового электродвигателя [Текст] / М.А. Грищенко // Транспорт Урала. – 2009. – № 1 (20). – С. 73 – 76.

312. Грищенко, М.А. Математическое моделирование процесса теплопередачи в якоре тягового электродвигателя тепловоза [Текст] / М.А. Грищенко // Известия петербургского университета путей сообщений. – 2010. – №1 (22). – С. 33 – 44.

313. Тихонов, Ф.В. Разработка методов выбора параметров асинхронного тягового двигателя с учетом теплового состояния обмоток [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / Ф.В. Тихонов. – М., 2008. – 136 с.

314. Брусиловский, И.В. Аэродинамика осевых вентиляторов [Текст] / И.В. Брусиловский. – М.: Машиностроение, 1984. – 240 с.

315. Куликов, Ю.А. Система охлаждения силовых установок тепловозов [Текст] / Ю.А. Куликов. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.

316. Логинова, Г.Ю. Совершенствование методов анализа теплового состояния тяговых электродвигателей тепловозов и характеристик их систем охлаждения [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук / Г.Ю. Логинова. – М., 2000. – 322 с.

317. Попов, Ю.В. Способы регулирования работы вентилятора охлаждающего устройства тепловоза 2М62 [Текст] / Ю.В. Попов. – Транспорт, наука, техника, управление: сб. техн. инф. – М.: ВИНТИ. – 2005. – № 2. – С. 31 – 32.
318. Гамаюнов, И.С. Мониторинг и управление качеством эксплуатации тяговых электродвигателей подталкивающих электровозов Восточно-Сибирской железной дороги [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / И.С. Гамаюнов. – Омск, 2008. – 182 с.
319. Захаренко, В.А. Особенности построения системы управления тепловыми режимами обмоток крупных электрических машин [Текст] / В.А. Захаренко // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2 (19). – Т.2. – С. 107 – 111.
320. Евстифеев, В.А. Определение структуры системы принудительного охлаждения электрических машин [Текст] / В.А. Евстифеев, А.В. Артеменко, Р.Г. Синенко // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2002. – Вип. 1 (12). – С. 122 – 125.
321. Евстифеев, В.А. Обоснование создания управляемого охлаждения электрических машин систем электропривода [Текст] / В.А. Евстифеев, Д.И. Родькин // Проблемы создания новых машин и технологий: сб. научн. трудов. – Кременчук: КДПИ, 2000. – Вып. 1/2000(8). – С. 92 – 94.
322. Сененко, Р.Г. Принципы построения систем управления охлаждением электрических машин [Текст] / Р.Г. Сененко, О.Ф. Кирьянов // Вісник КДПУ. – Кременчук: КДПУ, 2003. – Вип. 2 (19). – Т.2. – С. 112 – 115.
323. Михайлов, С.В. Улучшение качества практического применения тепловых моделей электродвигателей [Текст] / С.В. Михайлов, М.Г. Пирогов // Энергоэксперт. – 2011. – № 2. – С. 52 – 54.
324. Проектирование электрических машин [Текст]; под ред. И.П. Копылова – М.: Энергия, 1980. – 360 с.
325. Космодамианский, А.С. Теоретические основы и разработка систем регулирования температуры тяговых электрических машин локомотивов [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук / А.С. Космодамианский. – М., 2002. – 285 с.
326. Филиппов, И.Ф. Вопросы охлаждения электрических машин [Текст] / И.Ф. Филиппов. – М., Л.: Энергия, 1964. – 330 с.
327. Филиппов, И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах [Текст] / И.Ф. Филиппов. – Л.: Энергия, 1974. – 384 с.
328. Торба, С.В. Повышение экономичности режимов охлаждения тягового электрооборудования электровоза переменного тока [Текст]: автореф. ... дис. канд. техн. наук / С.В. Торба. – М., 1989. – 22 с.
329. Борисенко, А.И. Аэродинамика и теплопередача в электрических машинах [Текст] / А.И. Борисенко, В.Г. Данько, А.И. Яковлев. – Л.: Энергия, 1974. – 560 с.
330. Гуревич, Э.И. Переходные тепловые процессы в электрических машинах [Текст] / Э.И. Гуревич, Ю.Л. Рыбин. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд., 1983. – 216 с.

331. Сипайлов, Г.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах [Текст] / Г.А. Сипайлов, Д.И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
332. Некрасов, О.А. Взаимосвязь между условиями работы электроподвижного состава и нагреванием обмоток тяговых двигателей [Текст] / О.А. Некрасов // Труды ВНИИЖТ. – 1977. – Вып. 576. – С. 4 – 65.
333. Перцовский, М.Л. Расчет напряжения обмоток тяговых двигателей по методу тепловых параметров [Текст] / М.Л. Перцовский // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 286. – 1965. – С. 52 – 70.
334. Михальчук, Н.Л. Адаптивная система управления температурным режимом изоляции электрооборудования электровозов [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06 / Н.Л. Михальчук. – Иркутск, 2010. – 249 с.
335. Оленцевич, Д.А. Совершенствование системы технического содержания изоляции тяговых двигателей электровозов [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Д.А. Оленцевич. – Хабаровск, 2010. – 195 с.
336. Захарченко, Д.Д. Подвижной состав электрических железных дорог. Тяговые электрические машины [Текст] / Д.Д. Захарченко, П.Н. Шляхто. – М.: Гос. трансп. жел.-дор. изд-во. – 1959. – 236 с.
337. Глушков, В.М. Введение в АСУ [Текст] / В.М. Глушков. – К.: Техника, – 1974. – 294 с.
338. Растринин, Л.А. Современные принципы управления сложными объектами [Текст] / Л.А. Растринин. – М.: Сов. радио, – 1980. – 232 с.
339. 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.
340. 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.
341. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс [Текст]: пер. с англ. / С. Хайкин. – 2-е изд. испр. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2006. – 1104 с.
342. Блиндюк, В.С. Нейродинамічна модель системи автоматичного керування рухом поїздів: тез. докл. 24-й міжнарод. конф. «Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины» // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 5. – С. 121.
343. 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.
344. 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.
345. 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.

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

347. Дмитриенко, В.Д. Основы теории нейронных сетей [Текст] / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов. – Белгород: БИИММАП, 2001. – 159 с.

348. Оссовский, С. Нейронные сети для обработки информации [Текст] / С. Оссовский. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.

349. 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. XIX Міжнар. наук.-практ. конф, 1-3 червня 2011 р. – Харків: НТУ «ХП» – Ч. IV. – С. 62.

350. 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

351. 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.

352. Спосіб підвищення точності обліку і контролю електроенергії вимірювальним комплексом [Текст]: пат. 88126 України: МПК H01F 38/00, H01F 38/20, H01F 38/28 (на винахід) / Бутенко В.М., Блиндюк В.С., Гаєвський В.В. [та др.]; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № а 200903412; заявл. 09.04.2009; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 17. – 4 с.

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

354. Устройство и ремонт электропоездов метрополитена [Текст]: учеб. для ПТУ / Э.А. Сементовский, А.А. Богданов, В.С. Гусев, Ю.Я. Могильнер; под ред. Э.А. Сементовского. – М.: Транспорт, 1991. – 335 с.

355. Fausett I. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms, and Application [Text]. – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p.

356. 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.

357. Красовский, А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами [Текст] / А.А. Красовский, В.И. Буков, В.С. Шендрик. – М.: Наука, 1977. – 272 с.

358. Справочник по теории автоматического управления [Текст]; под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука. 1987. – 712 с.

359. 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.

360. Методы классической и современной теории автоматического управления [Текст]: учебник; под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – Т.4. Теория оптимизации систем автоматического управления. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 744 с.

361. Руководство по устройству электропоездов серии ЭР2, ЭР2Т, ЭД2Т, ЭТ2М [Текст]; под ред. Пегова Д.В., Бурцева П.В., Андреева В.Е. – М.: Центр Коммерческих Разработок. – 2003. – 184 с.

362. 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.

363. 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.

364. Гудкова, В.П. Основні напрямки підвищення ефективності пасажирських залізничних перевезень [Текст] / В.П. Гудкова // Зб. наук. праць. Сер. «Економіка та управління». – К.: КУЕТТ, 2003. – Вип. 3. – С. 81-86.

365. Гудков, О.М. Проблеми організації приміських пасажирських перевезень на залізничному транспорті [Текст] / О.М. Гудков // Проблеми економіки транспорту: тези допов. міжнар. наук. конф. – Дніпропетровськ: ДІТ, 2003. – С. 59-60.

366. Гудкова, В.П. Визначення приміських пасажиропотоків [Текст] / В.П. Гудкова, О.М. Гудков // Проблемы экономики и управления на железнодорожном транспорте: матер. междунар. науч.-практ. конф. – К.: КУЕТТ, 2006. – С. 30-32.

367. Семенцова, О.В. Методичні підходи до визначення тарифів на приміські залізничні перевезення в умовах конкуренції [Текст] / О.В.

Семенцова // Зб. наук. праць. Сер. «Економіка управління». – К.: КУЕТТ, 2007. – Вип. 9. – С. 46-52.

368. Новоселова, И.С. Возможности снижения убыточности пригородного пассажирского комплекса [Текст] / И.С. Новоселова // Железнодорожный транспорт. – 2007. – № 5. – С. 50-52.

369. Балака, Є.І. Закономірності розвитку приміських зон та транспортних систем, що їх обслуговують [Текст] / Є.І. Балака, О.В. Семенцова // Вісник економіки транспорту і промисловості. – Харків:

УкрДАЗТ, 2008. – № 23. – С. 84-86.

370. Семенцова, О.В. Обґрунтування встановлення відстані функціонування приміського комплексу відповідно адміністративним межам приміських зон [Текст] / О.В. Семенцова // Залізничний транспорт України. – 2008. – № 4. – С. 60-62.

371. Семенцова, О.В. Економічні аспекти адаптації приміського залізничного транспорту до ринкових умов [Текст]: дис. ... канд. екон. наук: 08.00.04 / О.В. Семенцова. – Харків, 2009. – 360 с.

372. Балака, Є.І. Соціальна значущість приміських залізничних перевезень в різних соціально-економічних умовах [Текст] / Є.І. Балака, О.В. Семенцова // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 4. – С. 85-88.

373. Методические рекомендации по комплексной оценке эффективности мероприятий, направленных на ускорение научно-технического прогресса (утв. постановлением ГКНТ и АН СССР 3 марта 1988 г.) [Текст]. – М.: ГКНТ СССР, 1988.

374. Методические рекомендации по определению экономической эффективности мероприятий научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте [Текст] / ВНИИЖТ МПС. – М.: Транспорт, 1991. – 239 с.

375. Балака, Є.І. Оцінка економічної доцільності інвестицій в інноваційні проекти на транспорті [Текст]: навч. посібник / Є.І. Балака, О.І. Зоріна, Н.М. Колесникова, І.М. Писаревський. – Харків: УкрДАЗТ, 2005. – 210 с.

376. Верба, В.А. Проектний аналіз [Текст]: підручник / В.А. Верба, О.А. Загородніх. – К.: КНЕУ, 200. – 322 с.

377. Бромвич, М. Анализ экономической эффективности капиталовложений [Текст]: пер. с англ. / М. Бромвич. – М.: ИНФРА-М, 1996. – 432 с.

378. Лист головного фінансово-економічного управління Укрзалізниця фінансово-економічним службам залізниць України від 26.04.2011 № ЦФ 16/187 [Текст].

379. Аналіз технічних несправностей тягових електричних двигунів електропоїздів служби приміських пасажирських перевезень Південної залізниці за друге півріччя 2010 р. і перше півріччя 2011 р [Текст].

380. Балака, Є.І. Основи економічного і соціального прогнозування [Текст]: навч. посібник / Є.І. Балака, Л.А. Балака, М.І. Главчев, О.І. Зоріна, І.М. Писаревський. – Харків: ХарДАЗТ, 2001. – 78 с.

381. Теория прогнозирования и принятия решений [Текст]: учеб. пособие; под ред. С.А. Саркисяна. – М.: Высш. школа, 1977. – 351 с.

382. 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.

383. Блиндюк, В.С. Перспективи зниження енергоємності перевезень шляхом автоматизації процесу керування рухом поїздів [Текст] / В.С.

Блиндюк // 36. наук. праць: тези допов. 74-ї міжнар. наук.-техн. конф. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 129. – С. 204.

384. Преобразовательная система [Текст]: пат. 2385237 Российская Федерация / Андросов Н. Н., Бабкина Т. Н., Булатов В. Л., Головин В. И. и др .; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие "Научно-производственное объединение автоматики имени академика Н.А. Семихатова"; заявл. 2008147979/11, 04.12.2008; опубл. 27.03.2010.

385. Иванов В.А., Медведев В.С., Чемоданов Б.К. Математические основы теории автоматического регулирования [Текст]: учеб. пособие для вузов; под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Высш. шк. – 1971. – 808 с.

386. Двополярный ключ (корисна модель): пат. 30066 Україна, МПК Н03К 17/62 [Текст] / Бутенко В.М., Блиндюк В.С., Головки О.В. [та др.]; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № у 200711340; заявл. 12.10.2007; опубл. 11.02.2008, Бюл. № 3. – 4 с.

387. Индуктивно-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.; заявник та патентовласник Українська державна академія залізничного транспорту. – № у 201111537; заявл. 29.09.2011; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. – 4 с.

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

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

390. Блиндюк, В.С. Аналіз ресурсозберігаючих технологій роботи підприємств залізничного транспорту [Текст] / В.С. Блиндюк // Перспективные компьютерные, управляющие и телекоммуникационные системы для железнодорожного транспорта Украины: тези допов. 23-ї міжнар. наук.-практ. конф. (м. Алушта, вересень 2010 р.). – Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – 2010. – № 4 (Додаток). – С. 39

Програмне забезпечення моделювання електрорушійної сили самоіндукції в двигунах постійного струму

А.1. Програма моделювання параметрів ротору (файли rotor.h, rotor.cpp)

```
// rotor.h: interface for the rotor class.
//
///////////////////////////////////////////////////////////////////

#ifndef AFX_ROTOR_H_256CEED7_8BC2_4AE6_8016_9BB9E15CAFE3__INCLUDED_
#define AFX_ROTOR_H_256CEED7_8BC2_4AE6_8016_9BB9E15CAFE3__INCLUDED_

#ifdef _MSC_VER > 1000
#pragma once
#endif // _MSC_VER > 1000

#include "stator.h"
#include <vector>

typedef std::vector<double*> ARRAYOFPTRDOUBLE;

class rotor
{
public:
    //выдает значения напряжений для count_rotate количества оборотов
    //при начальной скорости first_speed и конечной last_speed
    ARRAYOFPTRDOUBLE* get(double first_speed, double last_speed, int count_rotate=0);

    bool init(char* filename, stator* p_st);
    rotor();
    virtual ~rotor();
    int count_collector_plates;           //количество коллекторных пластин
    //угловая мера одной коллекторной пластины (360/count_collector_plates)
    double grad_size_collector_plates;

    int count_slots;                      //количество пазов якоря
    int size_calculate_samples;           //количество рассчитанных функцией get отсчетов
    stator* p_stator;                    //статор, в котором установлен данный ротор

    struct windings_of_anchor //структура обмоток якоря
    {
        int begin_plate; //начало обмотки - номер коллекторной пластины
        int begin_slot; //номер паза в котором лежит первая полуобмотка
        int end_plate; //конец обмотки - номер коллекторной пластины
        int end_slot; //номер паза в котором лежит вторая полуобмотка
        ARRAYOFDOUBLE voltage; //напряжение, которое наводится между begin_plate
и end_plate
    };
    typedef std::vector<windings_of_anchor> ARRAYOFANCHORWIND;
    ARRAYOFANCHORWIND wa;

private:
    //коэффициент пропорциональности между суммой наеденных напряжений
    //и выходным напряжением машины при заданном токе и скорости (калибровка)
    double voltage_prop;

```

```

        bool calc_voltage_between_plate(int count_sample);    //расчет напряжения при
        коммутации

        ARRAYOFPTRDOUBLE p_voltage_slots; //массив указателей на напряжения в каждом
        пазу
        bool calc_slots_voltage(ARRAYOFDOUBLE* p_arr); //расчет напряжений в каждом
        пазу по исходному массиву изменения индукции

        //тип обмотки петлевая "p"=1 или волновая "w"=2
        int tip;
        //шаг по пазам
        int step_slots;
        //шаг по коллектору
        int step_plates;
        //количество "мертвых" проводников
        int dead_conductor;
};

#endif // !defined(AFX_ROTOR_H_256CEED7_8BC2_4AE6_8016_9BB9E15CAFE3__INCLUDED_)

// rotor.cpp: implementation of the rotor class.
//
/////////////////////////////////////////////////////////////////
#include "stdafx.h"
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#include "rotor.h"

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// Construction/Destruction
/////////////////////////////////////////////////////////////////

rotor::rotor()
{
    size_calculate_samples = 0;
    p_stator = NULL;
}

rotor::~rotor()
{
    for(int j=0;j<p_voltage_slots.size();j++)
        if(p_voltage_slots[j]) delete [] p_voltage_slots[j];
    p_voltage_slots.clear();
}

bool rotor::calc_voltage_between_plate(int count_sample)
{
    if(p_voltage_slots.size()==0) return false;
    for(int i=0;i<wa.size();i++)
        for(int j=0;j<count_sample;j++)
            wa[i].voltage.push_back(p_voltage_slots[wa[i].begin_slot][j]-p_
voltage_slots[wa[i].end_slot][j]);
    return true;
}

bool rotor::calc_slots_voltage(ARRAYOFDOUBLE* p_arr)
{
    if(!p_arr) return false;
    int i,j,k;
    int step_slots = p_stator->size/count_slots;

```

```

int curr_pos_slots = 0;
for(i=0;i<count_slots;i++)
{
    double* p_voltage_slots_arr = new double[p_arr->size()];
    for(j=0;j<p_arr->size();j++) p_voltage_slots_arr[j]=0.0;
    k=0;
    for(j=curr_pos_slots;j<p_arr->size();j++)
        p_voltage_slots_arr[k++]=p_arr->at(j)*voltage_prop;

    curr_pos_slots+=step_slots;
    p_voltage_slots.push_back(p_voltage_slots_arr);
}
if(p_voltage_slots.size()!=count_slots) return false;
return true;
}

ARRAYOFPTRDOUBLE* rotor::get(double first_speed, double last_speed, int count_rotate)
{
    if(p_stator==NULL) return NULL;
    size_calculate_samples = 0;
    int count_cikls;
    if(count_rotate!=0)
    {
        //не было предварительной инициализации статора
        if(count_rotate*p_stator->size<p_stator->arr.size()) return NULL;
    } else count_cikls = p_stator->arr.size()/p_stator->size;

    double step_speed = (last_speed-first_speed)/(double)p_stator->arr.size();
    double curr_speed = first_speed;

    ARRAYOFDOUBLE tmp;
    for(int i=0;i<p_stator->arr.size();i++)
    {
        tmp.push_back(p_stator->arr[i]*curr_speed);
        curr_speed+=step_speed;
    }

    if(!calc_slots_voltage(&tmp)) return NULL;
    if(!calc_voltage_between_plate(tmp.size())) return NULL;
    size_calculate_samples = tmp.size();
    return &p_voltage_slots;
}

bool rotor::init(char *filename, stator* p_st)
{
    if(!filename) return false;
    if(!p_st) return false;
    p_stator = p_st;
    try
    {
        FILE* in;
        if((in=fopen(filename,"r+t"))==NULL) return false;

        const unsigned int MAX_SIZE = 65535;
        char in_str[MAX_SIZE];
        while(!feof(in))
        {
            fgets(in_str,MAX_SIZE,in);
            std::string str = in_str;
            if(str.find("#")!=0)
            {
                char param[MAX_SIZE];

```

```

for(int i=0;i<MAX_SIZE;i++) param[i]=0;

if(str.find("count_collector_plates")==0)
    if(str.copy(param,16,23)>0)
        count_collector_plates = atoi(param);

if(str.find("count_slots")==0)
    if(str.copy(param,16,12)>0)
        count_slots = atoi(param);

if(str.find("voltage_prop")==0)
    if(str.copy(param,32,13)>0)
        voltage_prop = atof(param);

if(str.find("file_name_windings_of_anchor")==0)
{
    if(str.copy(param,256,29)>0)
    {
        std::string tmp_str = param;
        int first = tmp_str.find("'")+1;
        int end = tmp_str.find("'",first);
        char tmp[MAX_SIZE];
        for(int j=0;j<MAX_SIZE;j++) tmp[j] = 0;
        if(tmp_str.copy(tmp,end-first,first)>0)
        {
            tmp[end-first] = 0;
            FILE* in_ind;
            if((in_ind=fopen(tmp,"r"))==NULL) return
false;

            while(!feof(in_ind))
            {
                char str_read_windings_of_anchor[
256];

                fgets(str_read_windings_of_anchor,
256,in_ind);

                = str_read_windings_of_anchor;

                if(str_read_windings_of_anchor[256];
или волновая "w"
                find("tip")==0)
                anchor.copy(tmp_param_windings_of_anchor,16,4)>0)

                windings_of_anchor[0]=='p') tip=1;
                windings_of_anchor[0]=='w') tip=2;

                find("step_slots")==0)
            }

            //шаг по пазам
            if(str_read_windings_of_anchor.

```

```

anchor.copy(tmp_param_windings_of_anchor,32,11)>0)
atoi(tmp_param_windings_of_anchor);
find("step_plates")==0)
anchor.copy(tmp_param_windings_of_anchor,32,12)>0)
atoi(tmp_param_windings_of_anchor);
проводников
find("dead_conductor")==0)
anchor.copy(tmp_param_windings_of_anchor,32,15)>0)
= atoi(tmp_param_windings_of_anchor);

if(str_windings_of_
step_slots =
//шаг по коллектору
if(str_windings_of_anchor.
if(str_windings_of_
step_plates =
//количество "мертвых"
if(str_windings_of_anchor.
if(str_windings_of_
dead_conductor

}
}
fclose(in_ind);
}
}
}
}
}
fclose(in);
}
catch( ... )
{
printf("error init rotor from script name %s",filename);
return false;
}
if(tip==0)
{
printf("error tip rotors");
return false;
}

grad_size_collector_plates = 360.0/(double)count_collector_plates;
int counter_slots = 0;
int count_conductor_in_slot = (count_collector_plates+dead_conductor)/count_slots;
for(int i=0;i<count_collector_plates;i++)
{
windings_of_anchor wofa;
wofa.begin_plate = i;
if(tip=1) wofa.end_plate = wofa.begin_plate+1;
if(tip=2)
{
wofa.end_plate = wofa.begin_plate+step_plates-1;
if(wofa.end_plate>count_collector_plates-1)
wofa.end_plate-=count_collector_plates;
}

if((i % count_conductor_in_slot == 0)&&(i!=0)) counter_slots++;
wofa.begin_slot = counter_slots;
wofa.end_slot = wofa.begin_slot+step_slots-1;
if(wofa.end_slot>count_slots-1)
wofa.end_slot-=count_slots;

```



```

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>

#include "stator.h"

/////////////////////////////////////////////////////////////////
// Construction/Destruction
/////////////////////////////////////////////////////////////////

stator::stator()
{
    size = 0;
}

stator::~stator()
{
}

double stator::at(int index)
{
    int i = index;
    while(i>size-1)
        i-=size;
    return distribution_induction[i];
}

double stator::changer_current(double curr_i)
{
    double sub_i = curr_i-save_current;
    double func_i = save_current;
    if(sub_i>0) func_i = save_current+(1.0-exp(-koef_inductance*fabs(sub_i)));
    if(sub_i<0) func_i = save_current-(1.0-exp(-koef_inductance*fabs(sub_i)));
    save_current = func_i;
    double d = 0.0;
    if(func_i<0.0) d = -1.0;
    if(func_i>0.0) d = 1.0;
    d*=(1-exp(-fabs(sigma*func_i)));
    save_induction = d;
    return d;
}

ARRAYOFDOUBLE* stator::get(int count, double first_current, double last_current)
{
    arr.clear();
    save_current = first_current;

    for(int i=0;i<count;i++)
        arr.push_back(at(i)*changer_current(last_current));

    return &arr;
}

bool stator::init(char *filename)
{
    if(!filename) return false;
    try
    {
        FILE* in;
        if((in=fopen(filename,"r+t"))==NULL) return false;

        const unsigned int MAX_SIZE = 65535;
        char in_str[MAX_SIZE];
    }
}

```

```

while(!feof(in))
{
    fgets(in_str,MAX_SIZE,in);
    std::string str = in_str;
    if(str.find("#")!=0)
    {
        char param[MAX_SIZE];
        for(int i=0;i<MAX_SIZE;i++) param[i]=0;

        if(str.find("count_main_poluses_in_machine")==0)
            if(str.copy(param,16,30)>0)
                count_main_poluses_in_machine = atoi(param);

        if(str.find("count_additional_poluses_in_machine")==0)
            if(str.copy(param,16,36)>0)
                count_additional_poluses_in_machine = atoi(param
);

        if(str.find("koef_inductance")==0)
            if(str.copy(param,16,16)>0)
                koef_inductance = atof(param);

        if(str.find("sigma")==0)
            if(str.copy(param,16,6)>0)
                sigma = atof(param);

        if(str.find("file_name_distribution_induction")==0)
        {
            if(str.copy(param,256,33)>0)
            {
                std::string tmp_str = param;
                int first = tmp_str.find("'")+1;
                int end = tmp_str.find("'",first);
                char tmp[MAX_SIZE];
                for(int j=0;j<MAX_SIZE;j++) tmp[j] = 0;
                if(tmp_str.copy(tmp,end-first,first)>0)
                {
                    tmp[end-first] = 0;
                    FILE* in_ind;
                    if((in_ind=fopen(tmp,"r"))==NULL) return
false;

                    while(!feof(in_ind))
                    {
                        char str_read[32];
                        if(fgets(str_read,32,in_ind)==NULL)

                            double d = atof(str_read);
                            distribution_induction.push_back(d
);

                    }
                    size = distribution_induction.size();
                    fclose(in_ind);
                }
            }
        }
    }
}

fclose(in);
}
catch( ... )

```

```

{
    printf("error init stator from script name %s",filename);
    return false;
}
if(size!=360)
{
    printf("size etalon distribution induction must be =360");
    return false;
}
return true;
}

```

A.3. Програма моделювання процесу комутації (файли switching.h, s switching.cpp)

```

// switching.h: interface for the switching class.
//
////////////////////////////////////
#if !defined(AFX_SWITCHING_H_E0161744_2A4C_4315_A3F1_C4E7A219A76A__INCLUDED_)
#define AFX_SWITCHING_H_E0161744_2A4C_4315_A3F1_C4E7A219A76A__INCLUDED_

#if _MSC_VER > 1000
#pragma once
#endif // _MSC_VER > 1000

#include "rotor.h"

class switching
{
public:
    ARRAYOFDOUBLE* get(ARRAYOFPTRDOUBLE* p_v_s);
    bool init(char* filename, rotor* p_rt);
    switching();
    virtual ~switching();
    ARRAYOFDOUBLE voltage;

private:
    //описание щеток в угловой мере по окружности якоря
    struct switching_geometry
    {
        double grad; //текущий угол от условного нуля (левая
половина геометрической нейтрали)
        int switching_number; //порядковый номер щетки (0-если нет щетки; 1
,2,3... если есть)
        bool plus_minus; //плюсовой (true) или минусовой (false) вывод
    };

    typedef std::vector<switching_geometry> ARRAYOFSWGGEOM;
    ARRAYOFSWGGEOM sw_g;

    std::string switching_plus;//перечисление плюсовых щеток (остальные минусовые)

    int count_lock_collector_plates; //количество замыкаемых при коммутации
коллекторных пластин
    rotor* p_rotor;
};

#endif // !defined(AFX_SWITCHING_H_E0161744_2A4C_4315_A3F1_C4E7A219A76A__INCLUDED_)

```

```

// switching.cpp: implementation of the switching class.
//
////////////////////////////////////////////////////////////////
#include "stdafx.h"
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <math.h>
#include <assert.h>
#include "switching.h"

////////////////////////////////////////////////////////////////
// Construction/Destruction
////////////////////////////////////////////////////////////////

switching::switching()
{
    p_rotor = NULL;
}

switching::~switching()
{
}

ARRAYOFDOUBLE* switching::get(ARRAYOFPTRDOUBLE* p_v_s)
{
    if(!p_v_s) return NULL;
    if(p_v_s->size()!=p_rotor->count_slots) return NULL;
    int count_sample = p_rotor->size_calculate_samples;
    if(count_sample<p_rotor->p_stator->size) return NULL;
    voltage.clear();
    for(int i=0;i<count_sample;i++) voltage.push_back(0.0);

    double curr_corner = 0.0;
    bool closed_plates;
    bool plus_minus=false;
    int sz=p_rotor->wa.size();
    int sz_v=voltage.size();
    int r_wa_sz=p_rotor->wa.size();
    for(int k=0;k<p_rotor->wa.size();k++)
    {
        for(int i=0;i<count_sample;i++)
        {
            closed_plates = false;
            int index = (int)curr_corner;
            int d = sw_g[index].switching_number;
            if(sw_g[index].switching_number!=0)
            {
                plus_minus = sw_g[index].plus_minus;
                closed_plates = true;
            }

            if(!closed_plates)
            {
                if (plus_minus) voltage[i] += p_rotor->wa[k].voltage[i];
                else voltage[i] -= p_rotor->wa[k].voltage[i];
            }

            if(curr_corner>358.0) curr_corner = 0.0;
            else curr_corner+=1.0;
        }
    }
}

```

```

        }
        curr_corner+=p_rotor->grad_size_collector_plates;
        if(curr_corner>358.0) curr_corner = 0.0;
    }
    return &voltage;
}

bool switching::init(char *filename, rotor* p_rt)
{
    if(!filename) return false;
    if(!p_rt) return false;
    p_rotor = p_rt;
    try
    {
        FILE* in;
        if((in=fopen(filename,"r+t"))==NULL) return false;

        const unsigned int MAX_SIZE = 65535;
        char in_str[MAX_SIZE];
        while(!feof(in))
        {
            fgets(in_str,MAX_SIZE,in);
            std::string str = in_str;
            if(str.find("#")!=0)
            {
                char param[MAX_SIZE];
                for(int i=0;i<MAX_SIZE;i++) param[i]=0;

                if(str.find("count_lock_collector_plates=")==0)
                    if(str.copy(param,16,28)>0)
                        count_lock_collector_plates = atoi(param);
                if(str.find("switching_plus=")==0)
                    if(str.copy(param,16,15)>0)
                        switching_plus = param;

                if(str.find("file_name_switching_geometry=")==0)
                {
                    if(str.copy(param,256,29)>0)
                    {
                        std::string tmp_str = param;
                        int first = tmp_str.find("\"")+1;
                        int end = tmp_str.find("\"",first);
                        char tmp[MAX_SIZE];
                        for(int j=0;j<MAX_SIZE;j++) tmp[j] = 0;
                        if(tmp_str.copy(tmp,end-first,first)>0)
                        {
                            tmp[end-first] = 0;
                            FILE* in_ind;
                            if((in_ind=fopen(tmp,"r"))==NULL) return
false;

                            while(!feof(in_ind))
                            {
                                char str_read[256];
                                switching_geometry sg;
                                if(fgets(str_read,256,in_ind)==NULL

) return false;

                                std::string tmp_str_read = str_read

;

                                sg.grad = atof(tmp_str_read.c_str

());

```


Програма розрахунків і відображення пускових характеристик тягових двигунів

```

# -*- coding: utf-8 -*-
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
import sys

I_ER2=np.loadtxt('I_ER2.txt')
I_IGBT=np.loadtxt('I_IGBT.txt')
#np.savetxt('I_ER2.txt',res,fmt='%12.8f')
#np.savetxt('I_IGBT.txt',R_IGBT,fmt='%12.8f')

#lamda = 0.01
#tmp = [np.exp(-lamda*i) for i in xrange(len(I_IGBT))]

#plt.plot(tmp[:400], 'g', linewidth=2.0)
#plt.grid(True)
#plt.show()
#sys.exit(0)
#I_IGBT_tmp = [1.1*I_IGBT[i]*tmp[i] for i in xrange(len(I_IGBT))]

I_IGBT_1_1 = [1.085*I_IGBT[i] for i in xrange(len(I_IGBT))]
I_IGBT_0_9 = [0.95*I_IGBT[i] for i in xrange(len(I_IGBT))]

tiks = [float(i)/16.0 for i in xrange(0,350,40)]
x = [i for i in xrange(0,350,40)]
plt.xticks(x, tiks)

plt.rc('font', family='Times New Roman')
plt.ylabel('Струми тягового двигуна\n при рушанні електропоїзда з місця (А)\n\n', fontsize=14,
horizontalalignment='center')
p1, = plt.plot(I_ER2[5:355], 'r', linewidth=5.0)
p2, = plt.plot(I_IGBT[5:355], 'k', linewidth=2.0)
p3, = plt.plot(I_IGBT_1_1[5:355], 'g', linewidth=2.0)
p4, = plt.plot(I_IGBT_0_9[5:355], 'b', linewidth=2.0)
plt.legend([p1,p2,p3,p4], [u'$\rho$-2, a_c=4,5 (м/с^2)$', u'$a_c=4,5 (м/с^2)$', u'$a_c=5,0 (м/с^2)$', u'$a_c=4,0 (м/с^2)$'], loc=8, prop={'size':16})
plt.text(330, 95, u't, (c)', fontsize=14)
plt.grid(True)
plt.show()

COUNT=350
w_ER2,w_IGBT_1_1,w_IGBT,w_IGBT_0_9=[],[],[],[]
STEP=16
s_ER2,s_IGBT_1_1,s_IGBT,s_IGBT_0_9=0.0,0.0,0.0,0.0
for i in xrange(0,COUNT,STEP):
    s_ER2+=sum(I_ER2[i:i+STEP])*750.0/3600.0

```

```

w_ER2.append(s_ER2)
s_IGBT_1_1+=sum(I_IGBT_1_1[i:i+16])*750.0/3600.0
w_IGBT_1_1.append(s_IGBT_1_1)
s_IGBT+=sum(I_IGBT[i:i+STEP])*750.0/3600.0
w_IGBT.append(s_IGBT)
s_IGBT_0_9+=sum(I_IGBT_0_9[i:i+STEP])*750.0/3600.0
w_IGBT_0_9.append(s_IGBT_0_9)

# w_ER2.append(sum(I_ER2[i:i+STEP])*750.0/3600.0)
# w_IGBT_1_1.append(sum(I_IGBT_1_1[i:i+16])*750.0/3600.0)
# w_IGBT.append(sum(I_IGBT[i:i+STEP])*750.0/3600.0)
# w_IGBT_0_9.append(sum(I_IGBT_0_9[i:i+STEP])*750.0/3600.0)
tiks = [i for i in xrange(len(w_ER2)-1)]
x = [i for i in xrange(len(w_ER2)-1)]
plt.xticks(x, tiks)

y_tiks = [float(i)/1000.0 for i in xrange(0,16000,1000)]
y = [i for i in xrange(0,16000,1000)]
plt.yticks(y, y_tiks)

plt.rc('font', family='Times New Roman')
#plt.ylabel(u'Щосекундне споживання електроенергії при рушанні електропоїзда з місця (КВт/год)\n\n',
fontSize=14,horizontalalignment='center')
plt.ylabel(u'Споживання електроенергії при рушанні електропоїзда з місця (КВт/год)\n\n', fontSize=14,
horizontalalignment='center')
p1, = plt.plot(w_ER2,'r',linewidth=5.0)
p2, = plt.plot(w_IGBT,'k',linewidth=2.0)
p3, = plt.plot(w_IGBT_1_1,'g',linewidth=2.0)
p4, = plt.plot(w_IGBT_0_9,'b',linewidth=2.0)
plt.legend([p1,p2,p3,p4], [u'$\Delta P-2, a_c=4,5 (м/с^2)$',u'$a_c=4,5 (м/с^2)$',u'$a_c=5,0 (м/с^2)$',u'$a_c=4,0 (м/с^2)$'], loc=2, prop={'size':16})
plt.text(21,-1.0, u't, (c)', fontsize=14)
plt.grid(True)
plt.show()

print("ER2="+str(sum(I_ER2[:COUNT])*750.0/3600.0))
print("I_IGBT_1_1="+str(sum(I_IGBT_1_1[:360])*750.0/3600.0))
print("I_IGBT="+str(sum(I_IGBT[:COUNT])*750.0/3600.0))
print("I_IGBT_0_9="+str(sum(I_IGBT_0_9[:COUNT])*750.0/3600.0))

sys.exit(0)

H=np.loadtxt('h.txt')
R=np.loadtxt('r_input.txt')
result = np.fft.ifft(np.fft.fft(R)/np.fft.fft(H)).real
np.savetxt('result.txt',result,fmt='%12.8f')

R_corr = []
for i in xrange(len(R)):
    if i<11: R_corr.append(R[i]+10.0)
    elif i>11 and i<21: R_corr.append(R[i]-2.0)
    elif i>21 and i<31: R_corr.append(R[i]+3.0)
    elif i>31 and i<41: R_corr.append(R[i]+1.0)
    elif i>41 and i<51: R_corr.append(R[i]-2.0)
    elif i>51 and i<53: R_corr.append(R[i]+5.0)
    elif i>53 and i<55: R_corr.append(R[i]+3.0)
    elif i>55 and i<58: R_corr.append(R[i]+1.0)
    elif i>73 and i<76: R_corr.append(R[i]-4.0)
    elif i>91 and i<94: R_corr.append(R[i]+3.0)
    elif i>115 and i<120: R_corr.append(R[i]-2.0)
    else: R_corr.append(R[i])

```

```

res = np.fft.fft(R)/np.fft.fft(H)

H_corr = np.fft.ifft(np.fft.fft(R_corr)/res).real
np.savetxt('H_corr.txt',H_corr,fmt='%12.8f')

res_corr = np.fft.ifft(np.fft.fft(R_corr)/np.fft.fft(H)).real
result = np.fft.ifft(np.fft.fft(R)/np.fft.fft(H_corr)).real

ax = plt.subplot(3,1,1)

tiks = [i/16 for i in xrange(0,400,40)]
x = [i for i in xrange(0,400,40)]
plt.xticks(x, tiks)

y_ticks = [i/100 for i in xrange(0,1800,200)]
y = [i for i in xrange(0,1800,200)]
plt.yticks(y, y_ticks)

plt.rc('font', family='Times New Roman')
plt.ylabel(u'Теоретична  $I_{T}^{\{Pr\}}(t)$  та фактична  $I_{\Phi}^{\{Pr\}}(t)$  імпульсні характеристики\n\n',
fontSize=12, horizontalalignment='center')
#plt.ylabel(u' $I_{T}^{\{Pr\}}(t)$  - первинна (теоретична)\n імпульсна характеристика, (КА)\n\n',
horizontalalignment='center')
p2, = plt.plot(H_corr[:400], 'r', linewidth=2.0)
p1, = plt.plot(H[:400], 'k', linewidth=1.0)
plt.legend([p1,p2], [u' $I_{T}^{\{Pr\}}(t)$ ', u' $I_{\Phi}^{\{Pr\}}(t)$ '], loc=1, prop={'size':16})
#plt.legend([p1], [u' $I_{T}^{\{Pr\}}(t)$ '], loc=1, prop={'size':16})
plt.text(380, -120, u't, (c)', fontsize=14)
plt.grid(True)

ax = plt.subplot(3,1,2)
tiks = [i/10 for i in xrange(0,400,40)]
x = [i for i in xrange(0,400,40)]
plt.xticks(x, tiks)
#plt.ylabel(u' $Y_{T}(v)$  - первинна пускова\n характеристика, (A)\n\n',
fontSize=14, horizontalalignment='center')
plt.ylabel(u'Первинна  $Y_{T}(v)$  та фактична  $Y_{\Phi}(v)$  пускові характеристики, (A)\n\n',
horizontalalignment='center')
p2, = plt.plot(R_corr[:400], 'r', linewidth=2.0)
p1, = plt.plot(R[:400], 'k', linewidth=1.0)
plt.legend([p1,p2], [u' $Y_{T}(v)$ ', u' $Y_{\Phi}(v)$ '], loc=4, prop={'size':16})
plt.text(380, -15, u'v, (км/год)', fontsize=14)
plt.grid(True)

ax = plt.subplot(3,1,3)
tiks = [i/16 for i in xrange(0,400,40)]
x = [i for i in xrange(0,400,40)]
plt.xticks(x, tiks)
#plt.ylabel(u' $X_{T}(v)$  - первинна керуюча\n послідовність, (A)\n\n',
fontSize=14, horizontalalignment='center')
plt.ylabel(u'Первинна  $X_{T}(v)$  та корегована  $X_{\Phi}(v)$  керуючі послідовності, (A)\n\n',
horizontalalignment='center')
p2, = plt.plot(res_corr[:400], 'r', linewidth=2.0)
p1, = plt.plot(result[:400], 'k', linewidth=1.0)
plt.legend([p1,p2], [u' $X_{T}(v)$ ', u' $X_{\Phi}(v)$ '], loc=1, prop={'size':16})
plt.grid(True)
plt.text(380, -0.007, u't, (c)', fontsize=14)
plt.show()

'''
tiks = [float(i)*0.2 for i in xrange(0,20,5)]
x = [i for i in xrange(0,20,5)]

```

```
plt.xticks(x, tiks)

plt.rc('font', family='Times New Roman')
plt.ylabel(u'Первинна  $Y_{T}(v)$  та фактична  $Y_{\Phi}(v)$ \n пускові характеристики, (А)\n\n', fontsize=16,
horizontalalignment='center')
p2, = plt.plot(R_corr[:20], 'r', linewidth=2.0)
p1, = plt.plot(R[:20], 'k', linewidth=2.0)
plt.legend([p1, p2], [u' $Y_{T}(v)$ ', u' $Y_{\Phi}(v)$ '], loc=4, prop={'size': 16})
plt.text(16, -7, u'v, (км/год)', fontsize=14)
plt.grid(True)
plt.show()

sys.exit(0)
'''
```

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Начальник ДП
«Південна залізниця»

О.В. Філатов
„27” 02 2013



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Виктор УкрДА

М. Данько
2013



Акт
„27” лютого 2013 р.
м. Харків

Про впровадження результатів дисертаційної роботи Блиндюка В. С. «Методи та моделі прогнозування ефективних параметрів керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу» згідно з договором про науково-технічне співробітництво між Українською державною академією залізничного транспорту (УкрДАЗТ) та Південною залізницею.

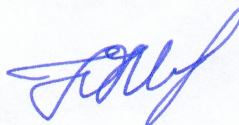
Комісія:

Голова комісії - заступник начальника ДП
«Південна залізниця» з рухомого складу і
матеріально-технічного постачання

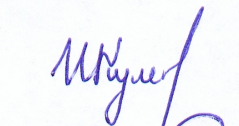
 С.А. Павлов

Члени комісії:

- начальник служби локомотивного
господарства

 Ю.А. Мирошніченко

- начальник служби
приміських пасажирських
перевезень

 І.Л. Кухарчик

- начальник моторвагонного
депо «Харків»

 В.Ф. Остапов

- кандидат технічних наук,
доцент Української державної
академії залізничного транспорту

 В.С. Блиндюк

Комісія визначила впровадження наступних результатів дисертаційної роботи В.С. Блиндюка у 2011-2012 роках:

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

Підставою для впровадження розробок є договір про науково-технічне

співробітництво між Українською державною академією залізничного транспорту та Південною залізницею.

Економічне обґрунтування ефективності розробки і використання зазначеної системи здійснено, виходячи з можливості її використання на приміських електропоїздах Південної залізниці, що входять до складу моторвагонних депо ст. Харків, ст. Люботин, ст. Полтава.

Впровадження вищевказаних розробок дозволяє визначити оптимальний швидкісний режим руху електропоїздів, що забезпечує найбільш ефективне використання тягових можливостей електродвигунів, гальмівних систем, деталей, вузлів і механізмів візків та інших агрегатів електропоїздів. Крім того зменшується втомлюваність локомотивних бригад, що позитивно впливає на безпеку руху. Зазначені чинники обумовлюють скорочення витрат електроенергії на тягу поїздів, збільшення їх міжремонтного циклу, зниження темпів зносу інших вузлів і агрегатів електропоїздів і, відповідно, скорочення поточних витрат на їх експлуатацію.


Очікується, що загальна сума економічного ефекту від впровадження запропонованих методів формування оптимальних параметрів керування тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу і застосування їх протягом шести років з урахуванням зміни вартості грошей в часі згідно з дисертаційною роботою Блиндюка В.С. складе 29571,6 тис. грн.

Висновки і рекомендації про подальше використання розробок - рекомендувати для подальшого використання конструкторськими, експлуатаційними і проектними організаціями на магістральному та промисловому транспорті на умовах співробітництва між ДП «Південна залізниця» та Українською державною академією залізничного транспорту.

Акт складений у чотирьох екземплярах:

- один екз. - ДП «Південна залізниця», служба локомотивного господарства;
- три екземпляри - Українська державна академія залізничного транспорту

Голова комісії - заступник начальника ДП «Південна залізниця» з рухомого складу і матеріально-технічного постачання

 С.А. Павлов

Члени комісії:

- начальник служби локомотивного господарства

 Ю.А. Мирошніченко

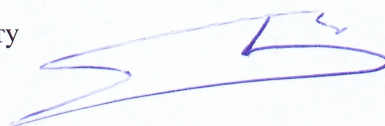
- начальник служби приміських пасажирських перевезень

 І.Л. Кухарчик

- начальник моторвагонного депо «Харків»

 В.Ф. Осташов

- кандидат технічних наук, доцент Української державної академії залізничного транспорту

 В.С. Блиндюк

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з науково-педагогічної
роботи УкрДАЗТ, професор

А.О.Каграманян



**Акт про впровадження
результатів дисертаційної роботи
Блиндюка Василя Степановича
за темою:**

**«Методи та моделі прогнозування ефективних параметрів керування
тяговим електроприводом моторвагонного рухомого складу»**

у навчальному процесі Навчально-наукового Інституту перепідготовки та
підвищення кваліфікації кадрів УкрДАЗТ.

Основні результати науково-дослідної роботи Блиндюка В.С., які використовуються в навчальному процесі:

- інтелектуальні методи та засоби автоматичного керування моторвагонним рухомим складом на основі нейромережевої асоціативної пам'яті;
- методи керування моторвагонним рухомим складом з тяговими електроприводами постійного струму на основі геометричної теорії управління з визначенням раціональних параметрів автоматичного керування електропоїздів при додаткових обмеженнях характеристик перехідних динамічних процесів;
- методи моделювання контурів керування тяговим електроприводом;
- дослідження пускових режимів роботи тягового електропривода електропоїзда;
- методи оцінки ступеня іскріння тягових двигунів;
- метод динамічного прогнозування теплових режимів роботи тягових двигунів на основі рекурентної нейродинамічної моделі.

Вказані розробки використовувалися при проведенні занять на курсах підвищення кваліфікації керівників та фахівців залізничного транспорту, зокрема:

- начальників, заступників начальників, головних інженерів служб локомотивного господарства, начальників локомотивних депо, заступників начальників ТЧ, РПЧ з експлуатації, заступників начальників ТЧ, РПЧ з ремонту;

- начальників та фахівців технічних відділів локомотивних служб та виробничо-технічних відділів локомотивних депо (РПЧ);
- головних інженерів ЛВЧД, ВЧ, інженерів з приймання вагонів служб та депо, головних механіків, головних технологів ЛВЧД, ВЧ, інженерів-технологів, начальників ПТО, помічників Л, ЛВЧД, ЛВЧ з безпеки руху;
- начальників та фахівців центрів оперативно-технічного обліку ТЧ (РПЧ), резерву локомотивних бригад, баз запасу локомотивів;
- фахівців локомотивних служб та локомотивних депо з нормування та обліку використання паливно-енергетичних ресурсів.

Розробки дисертаційної роботи використовувалися в навчальному процесі при викладанні курсів: «Удосконалення роботи підприємств локомотивного господарства в сучасних умовах», «Удосконалення технології роботи підприємств локомотивного господарства в сучасних умовах», «Впровадження удосконалених технологій при технічному обслуговуванні та поточному ремонті пасажирського рухомого складу», «Удосконалення технології роботи підприємств локомотивного господарства», «Порядок нормування та аналізу використання паливно-енергетичних ресурсів в локомотивному господарстві. Основні напрямки роботи з енергозбереження на залізничному транспорті».

Заступник директора НН ІППК,
к.т.н., доцент



В.В.Захарченко

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з навчальної роботи
 Національного технічного університету
 «Харківський політехнічний інститут»
 проф. д.т.н. С.І. Сокол
 « 11 » Вісень 2013 р.

АКТ

про використання в навчальному процесі кафедри «Обчислювальна техніка та програмування» НТУ «ХПІ» результатів докторської дисертаційної роботи здобувача Блиндюка Василя Степановича

Комісія у складі декана факультету «Комп'ютерні та інформаційні технології», к.т.н., проф. Запововського М.Й. (голова комісії), професора кафедри «ОТП» к.т.н. Зикова І.С. та професора кафедри «ОТП», д.т.н. Носкова В.І., розглянула стан використання матеріалів дисертаційної роботи Блиндюка В.С. при підготовці бакалаврів, спеціалістів та магістрів за напрямком 6.0915 «Комп'ютерна інженерія».

Комісія прийшла до висновку:

1. Матеріали докторської дисертаційної роботи Блиндюка В.С. використані при викладанні учбової дисципліни «Системний аналіз та комп'ютерне моделювання» у розділі «Комп'ютерне моделювання неперервних систем» та учбової дисципліни «Бортові системи управління» у розділі «Інформатизація та автоматизація систем управління» для студентів спеціальностей: «Комп'ютерні системи та мережі», «Спеціалізовані комп'ютерні системи», «Системне програмування».
2. Розроблені автором дисертації математичні моделі електромеханічних систем поїздів використовуються у лабораторному практикумі, у дипломних роботах спеціалістів та магістрів напрямку 6.0915 «Комп'ютерна інженерія».

Голова комісії

декан факультету «КІТ»,
 к.т.н., проф. М.Й. Запововський

Члени комісії

проф. каф. «ОТП», к.т.н., І.С. Зиков

проф. каф. «ОТП», д.т.н., В.І. Носков