

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ІНСТИТУТ ІНФРАСТРУКТУРИ І ТРАНСПОРТУ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ**

ШИЛО СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 621.31

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОЇ ПЕРЕДАЧІ
ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт
275 – транспортні технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Електричні та електронні апарати» Національного університету «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
дійсний член Транспортної академії України
Андрієнко Петро Дмитрович,
завідувач кафедри «Електричні та електронні апарати»
(Національний університет «Запорізька політехніка»,
м. Запоріжжя)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сінчук Олег Миколайович
завідувач кафедри електричної інженерії
(Криворізький національний університет)

кандидат технічних наук, доцент
Балійчук Олексій Юрійович
доцент кафедри електротехніки та електромеханіки
(Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту
Українського державного університету науки і
технологій)

Захист відбудеться «24» квітня 2025 р. о 14 годині 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.06 при Дніпровському інституті інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій за адресою: 49010, Україна, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Дніпровського інституту інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій або на сайті університету <https://nmetau.edu.ua/ua/mscience/i10/p4782> (Наука - Спеціалізована вчена рада Д 08.084.06).

Автореферат розісланий «20» березня 2025 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.06,
доктор технічних наук, професор



А.М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливим напрямом ефективного вдосконалення технічних і економічних характеристик систем тягової електропередачі є впровадження сучасних досягнень силової напівпровідникової і мікропроцесорної техніки. Особливо це відноситься до електропоїздів українських залізниць, де наразі в експлуатації використовуються високовольтні контактено-резистивні пускові тягові пристрої та електромашинні високовольтні перетворювачі для живлення кіл власних потреб.

Проектуванням і дослідженням тягового електропривода, а також рухомого електричного складу, статичних напівпровідникових перетворювачів для тягових електротехнічних комплексів займаються багато відомих організацій та фірм, зокрема ВАТ Холдингова компанія «Лугансктепловоз» (м. Луганськ), Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій (м. Дніпро), Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Estel (Естонія), Siemens (Німеччина), АВВ (Швейцарія), Westinghouse Electric Corp. (США), Ansaldo Transporti (Італія), Hitachi (Японія) і ін. Цій проблемі присвячені наукові праці таких відомих учених, як В.Е. Розенфельд, В.П. Феоктістов, Г.К. Гетьман, М.В. Панасенко, А.М. Муха, В.І. Омеляненко, В.В. Літовченко, О.Р. Чаусов, С.І. Вольський, Л.В. Бірзнієкс, І.П. Ісаєв, Г.Г. Басов, В.І. Носков, І.Я. Ранькіс, О.М. Сінчук, М.М. Акодїс, F.C. Lee (США), I. Smith (Великобританія), O. Wasynczuk (Індія), R. Hoft (США), T. Міяшита (Японія), J. Viess (США) та інші.

Сучасна тенденція розвитку електрорухомого складу в зв'язку з широким розповсюдженням впровадження силової напівпровідникової електроніки пов'язана з широким використанням асинхронного тягового електроприводу і створенням швидкісного електротранспорту. Цю тенденцію підтверджує розробка та виробництво сучасних електроприводів як закордонними компаніями (Alston, Siemens, АВВ, Hyundai та інші), так і вітчизняними підприємствами (Крюківський вагонобудівний завод (двосистемний електропоїзд ЕКр-1 «Тарпан»); ТОВ НДІ «Перетворювач», ДП «Електровагонмаш» (дизель-поїзд ДЕЛ-02 Луганського тепловозобудівного заводу)).

Розвиток швидкісного руху потребує підвищення пропускної спроможності тягових мереж, особливо це стосується тягових мереж постійного струму. Новітні дослідження показують, що при напрузі контактної мережі 18–35 кВ побудова мереж постійного струму потребує на 20–30% менше капіталовкладень у порівнянні з побудовою мереж змінного струму.

Існуюча практика капітальних ремонтів електропоїздів в Україні використовує частково їх модернізацію для приведення салонів вагонів та кабін машиністів до сучасного стану і заміни застарілого обладнання в основному джерел живлення власних потреб на сучасні зразки.

З точки зору підвищення напруги мережі постійного струму необхідна розробка нових концепцій побудови тягових мереж і комплексу тягового

електрообладнання. Вказана проблема може бути частково реалізована поступовими кроками підвищення напруги мережі постійного струму до 4-6 кВ з використанням запасу по ізоляції мережі 3 кВ (стан ізоляції 6 кВ) з подальшим використанням інверторно-трансформаторних схем (eTransformer).

Виходячи зі сказаного виникає науково-технічне завдання в дослідженні і розробці енергоефективного комплектного тягового електрообладнання електропоїздів постійного струму на базі сучасних досягнень в області напівпровідникових приладів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана на кафедрі «Електричні та електронні апарати» Національного університету «Запорізька політехніка» відповідно до тематичного плану наукових досліджень за держбюджетною темою ДБ 03715 «Енергоощадне керування експлуатаційними характеристиками та параметрами систем електричної тяги автономного електрорухомого складу» (номер держреєстрації 0115U002567) та кафедральною науковою темою №03418 «Дослідження системи прогнозування енергоефективності та діагностики високовольтного обладнання», а також планів ТОВ «НДІ Перетворювач» по створенню перетворювачів для тягових передач рухомого залізничного транспорту і промислових електроприводів постійного та змінного струму.

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка та дослідження алгоритмів роботи, засобів технічної реалізації, спрямованих на підвищення техніко-економічних показників тягових високовольтних перетворювачів електропередачі електропоїздів.

Для досягнення вказаної мети вирішені наступні завдання:

1. Аналіз існуючих і перспективних принципів побудови тягових високовольтних електротехнічних комплексів залізничного транспорту з двигуном постійного та змінного струмів.

2. Розробка системи енергоефективного імпульсного регулювання модернізованого тягового електроприводу постійного струму, що забезпечує покращення статичних та динамічних характеристик приводу.

3. Розробка нових алгоритмів керування та комп'ютерних моделей аналізу режимів роботи модернізованої схеми тягового електроприводу в середовищі вибраного пакету прикладних програм.

4. Аналіз електромеханічних процесів в розробленому високовольтному електротехнічному комплексі в статичному та динамічному режимах на комп'ютерних моделях.

5. Оцінка перспективних напрямків розробки та модернізації тягової електропередачі та перетворювачів власних потреб електропоїздів постійного струму.

6. Експериментальна перевірка на макетному зразку отриманих розрахунково-теоретичних положень і результатів комп'ютерного моделювання.

Об'єктом дослідження є електромеханічні процеси у тягових електропередачах електропоїздів постійного струму.

Предметом дослідження є алгоритми та схемотехнічні рішення формування нестационарних режимів тягових електропередач.

Методи дослідження. В дисертаційній роботі методами дослідження при вирішенні поставлених завдань стали загальноприйняті в електротехніці, електромеханіці та теорії електричних кіл аналітичні методи і сучасні засоби комп'ютерного моделювання із застосуванням спеціалізованого пакету прикладних програм MatLab.

Достовірність теоретичних положень, отриманих результатів комп'ютерного моделювання підтверджена експериментальними дослідженнями на виготовлених макетних зразках та стендах ТОВ НДІ «Перетворювач».

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше:

– розроблені та досліджені нові алгоритми, що дозволяють методом змінної структури імпульсного перетворювача, на відміну від існуючих, формувати статичні та динамічні характеристики двигуна постійного струму з послідовним збудженням аналогічні двигунам з незалежним збудженням без застосування допоміжних джерел живлення та підвищити техніко-економічні показники тягового електроприводу;

– розроблено алгоритм, який дозволяє засобами силової електроніки у тяговому перетворювачі зі змінною структурою реалізувати швидкодіючий захист від режимів ковзання та боксування послідовно з'єднаних двигунів послідовного збудження, що сприяє покращенню тягових характеристик приводу.

– методом комп'ютерного моделювання досліджено новий алгоритм захисту від ковзання ходових коліс тягового приводу та отримані нові залежності параметрів двигунів (струму, напруги, швидкості) від коефіцієнту зчеплення.

2. Отримали подальший розвиток:

– методика порівняльного вибору напівпровідникових приладів, яка, на відміну від існуючої, враховує реальні коефіцієнти теплового стану та втрати потужності;

– метод дослідження теплових процесів систем напівпровідник-охолоджувач, який, на відміну від існуючих, враховує повну модель конструкції охолоджувачів, яка входить в модель імпульсного перетворювача.

Практична цінність роботи:

– досліджені нові алгоритми, які дозволили запропонувати нову схему імпульсного перетворювача зі змінною структурою для тягового електроприводу з двигуном послідовного збудження для електропоїздів постійного струму, яка дозволяє сформувати його статичні та динамічні характеристики аналогічні приводам з двигуном постійного струму з незалежним збудженням, на відміну від існуючих, без допоміжних джерел живлення обмотки збудження, що дозволяє підвищити на 1-5% пусковий момент, забезпечити гальмування з постійним моментом до швидкості приблизно 8% від номінальної та підвищити техніко-економічні показники в цілому.

– розроблено комп'ютерну модель та досліджено швидкодіючу схему захисту від боксування та надані рекомендації до схеми модернізованої електропередачі з імпульсним регулюванням моторних вагонів електропоїзду;

– розроблено і виготовлено випробувальний стенд та проведені експериментальні дослідження працездатності та достовірності комп'ютерної моделі запропонованої модернізованої схеми імпульсного перетворювача;

– проведено порівняльний аналіз модернізованої схеми імпульсного перетворювача з перспективними схемами з частотно-регульованим асинхронним двигуном;

– надані рекомендації по шляху реалізації модернізації тягового електроприводу електропоїздів з урахуванням сучасного економічного стану України;

– основні результати роботи використані ТОВ НДІ «Перетворювач» при розробці проєктів модернізації тягового електропривода з ДПЗ електровозу ЧМ1, механізмів переміщення мостового крану вантажопідйомністю Алчевського меткомбінату та при реалізації перетворювача власних потреб дизель-поїздів ДЕЛ-02 виробництва ПАТ «Луганськтепловоз»;

– результати дисертаційної роботи впроваджено в освітній процес Національного університету «Запорізька політехніка» при викладанні дисциплін: «Регулювання та керування електромеханічних систем»; «Основи силової електроніки»; «Силові електронні пристрої енергоємних виробництв».

Особистий вклад здобувача. Усі наукові результати та висновки, які складають основний зміст дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно. В друкованих працях, опублікованих у співавторстві, особисто дисертанту належить: [1] розробка та адаптація системи тестування модифікованого генетичного алгоритму; [2] методика розрахунку частотних залежностей випромінювальної ефективності, коефіцієнтів поглинання, розсіювання та відбивання; [3] методика застосування системи обробки даних при обробці температурних режимів роботи електричних апаратів; [4] програмне забезпечення визначення параметрів нагрівання при теплових випробуваннях; [5] методика моделювання роботи перетворювача в режимі реального часу з врахуванням теплових режимів роботи кристалів силового модуля; [6] запропонована модернізована схема тягової передачі з ДПЗ, яка відрізняється від класичної включенням допоміжного діоду у сумісне коло якоря та обмотки збудження, що дозволяє формувати характеристики ДПЗ аналогічні двигунам з незалежним збудженням без застосування допоміжного джерела живлення, та імітаційна модель нової схеми; [7] ефективна система керування для режиму боксування колісних пар, яка базується на удосконаленій схемі регулювання струму тягових двигунів; [8] імітаційна модель, яка дозволяє проводити дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів в двигуні постійного струму з послідовним збудженням в режимі динамічного гальмування та визначено вимоги до граничних параметрів роботи елементів схеми; [9] імітаційні моделі, які дозволяють досліджувати електромеханічні процеси в двигуні постійного струму з послідовним збудженням; [10] запропоновано використання методу неймереж для прогнозування стану вологості ізоляції лінійних (масляних) трансформаторів, що забезпечує його ремонт не за жорстким графіком, а згідно з дійсним станом ізоляції; [11] визначено базові критерії оцінки можливості заміни електромашинних

перетворювачів на напівпровідникові; запропоновано використання уніфікованих рішень при модернізації електропоїздів та електропотягів постійного струму; [12] імітаційна модель, яка дозволяє проводити дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів в двигуні постійного струму з послідовним збудженням в режимі динамічного гальмування при низьких частотах обертання; [13] аналіз і порівняння характеристик схемних рішень; [14] аналітичний опис електромеханічних процесів вдосконаленої схеми імпульсного регулювання; [16] моделювання на розробленій моделі.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати досліджень доповідалися здобувачем та обговорювалися на 6 конференціях, серед них: IV Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація транспорту "Транселектро-2010"» (м. Місхор, 18-22 вересня 2010р.); V Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» (смт. Воловець, Закарпатська обл., 11-13 червня 2014р.); VII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2014» (м. Дніпро, 23-26 жовтня 2014р.); 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, CADSM 2019, Polyana-Svalyava (Zakarpattya), Ukraine, 26 February – 2 March, 2019; Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми ресурсозбереження в промисловості та на транспорті» (м. Харків, 23 – 25 жовтня 2024 року).

Публікації. Основні матеріали дисертації відображені у 11 публікаціях, зокрема: 9 статей у фахових наукових виданнях; 2 статті у матеріалах міжнародних конференцій (індексуються в НБД Scopus та Web of Science), 6 тез доповідей на конференціях.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків та переліку джерел з посиланнями із 83 найменуваннями, трьох додатків з актами впровадження та описом експериментального стенду. Загальний обсяг дисертації – 156 сторінок, включаючи 5 таблиць, 53 рисунка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, представлено наукові положення, а також наукову та практичну цінність отриманих результатів. Окремо зазначено особистий внесок автора в результати публікацій, описано структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** виконано аналіз сучасного стану дослідження та реалізації електроприводів постійного та змінного струмів для залізничного транспорту. Проведено огляд принципів їх побудови та методів дослідження. Встановлено, що на існуючому рухомому складі українських залізниць постійного струму для регулювання швидкості обертання тягових електродвигунів використовується реостатно-контакторне керування, яке має багато недоліків, а саме наявність значної кількості контакторної апаратури, значних втрат електроенергії в режимі пуску, пульсації крутного моменту в

момент пуску приводу, залежність швидкості від крутного моменту на валу тягових електродвигунів, складність в реалізації систем захисту від боксування та юзу. Основним напрямком усунення зазначених недоліків є модернізація тягових передач із застосуванням напівпровідникових перетворювачів. Існує ряд розробок, які дозволяють проводити вказану модернізацію, проте кожна з них має свої переваги та недоліки, обумовлені або значною кількістю напівпровідникових приладів в схемі, і відповідно складністю конструкції, або ж при спрощенні силової схеми з'являлась необхідність залишати додаткові джерела живлення обмоток збудження в режимах реостатного та рекуперативного гальмування.

Сформульована постановка науково-практичної задачі зі створення енергоефективної схеми імпульсного регулювання швидкості обертання тягових двигунів постійного струму послідовного збудження (ДПЗ), яка викладена у розділі мета та завдання дослідження автореферату.

Другий розділ присвячений розробці електронної схеми імпульсного регулювання ДПЗ та математичних і комп'ютерних моделей режимів роботи. Запропонована модернізована схема імпульсного регулювання ДПЗ, яка не потребує допоміжних джерел живлення при формуванні гальмівних режимів, еквівалентних двигунам з незалежним збудженням (рис. 1).

Особливість принципу дії модернізованої схеми полягає у наступному. При модуляції струму ключом K1 у режимі пуску наявність діодів D3-D4 дозволяє суттєво знизити пульсацію струму збудження у порівнянні з пульсаціями струму якоря, що призводить до збільшення його середнього значення за рахунок збільшення середнього струму збудження. Сказане ілюструється діаграмами зміни струму та напруги в колах якоря та збудження на рис. 1,б.

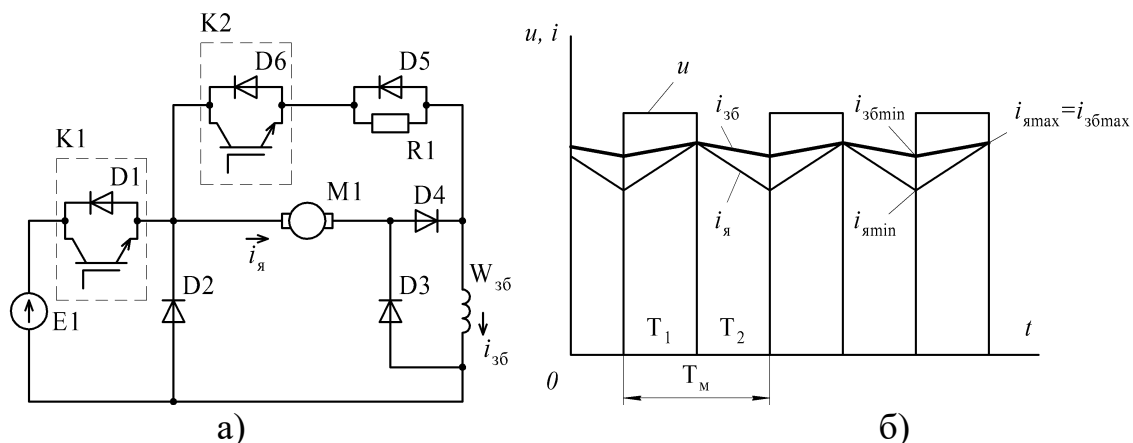


Рисунок 1 – Модернізована схема імпульсного регулювання частоти обертання електроприводу з ДПЗ (а) та діаграма напруг та струмів у колі якоря та збудження при роботі ключа K1 (б)

Вказане явище пояснюється значною різницею постійних часу обмоток якоря $T_{я}$ та збудження $T_{зб}$. Для тягових двигунів типу 1ДТ-003.5У постійна часу кола якоря дорівнює $T_{я} = 0,04$ с., а обмотки збудження - $T_{зб} \approx 0,3 \div 0,4$ с. Відношення постійних часу складає $T_{зб}/T_{я} \approx 8 \div 10$.

$$T_{\text{я}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}} \text{ та } T_{\text{зб}} = L_{\text{зб}}/R_{\text{зб}},$$

$$\gamma_1 = T_1/T_{\text{м}}, \quad (1)$$

де $L_{\text{я}}$, $L_{\text{зб}}$, $R_{\text{я}}$, $R_{\text{зб}}$, γ_1 – індуктивності обмотки якоря і обмотки збудження, активні опори обмотки якоря та обмотки збудження, щільність імпульсів відповідно.

При включенні К2 діод D4 зачинається, а струм якоря $i_{\text{я}}$ проходить через діод D3. При цьому струм діода зменшується на величину $i_{\text{я}}$ відповідно до співвідношення (2)

$$i_{\text{D3}} = i_{\text{зб}} + \Delta i_{\text{зб}} - i_{\text{я}} \approx i_{\text{яmax}} + \Delta i_{\text{зб}} - i_{\text{я}}, \text{ де } i_{\text{зб}} = \frac{\gamma_1 E_1}{R_1}. \quad (2)$$

При досягненні необхідної величини струму збудження ключ К2 вимикається, струм збудження сягає величини

$$i_{\text{зб}} = i_{\text{яmax}} + \Delta i_{\text{зб}}. \quad (3)$$

Зростання $i_{\text{зб}}$ призводить до зростання потоку збудження та, відповідно, моменту ТЕД. Ефективність цього алгоритму зростає при $I_{\text{я}} < I_{\text{н}}$.

Проведено аналіз роботи перетворювача в режимах пуску, рекуперації, гальмування та розроблено схему реалізації алгоритмів роботи ключів із застосуванням неперервності струму в електричних колах імпульсного перетворювача та ДПЗ. Математична модель представлена рівняннями контуру живлення, рівняннями динамічного руху, магнітного моменту ДПЗ з урахуванням імпульсної напруги на інтервалі модуляції керуючого сигналу ключами перетворювача та алгоритмом, який формує зміну структуру силових кіл в залежності від вимог до динаміки роботи ДПЗ.

На рисунку 2 представлена повна принципова схема моторного вагону електропоїзду постійного струму з ДПЗ.

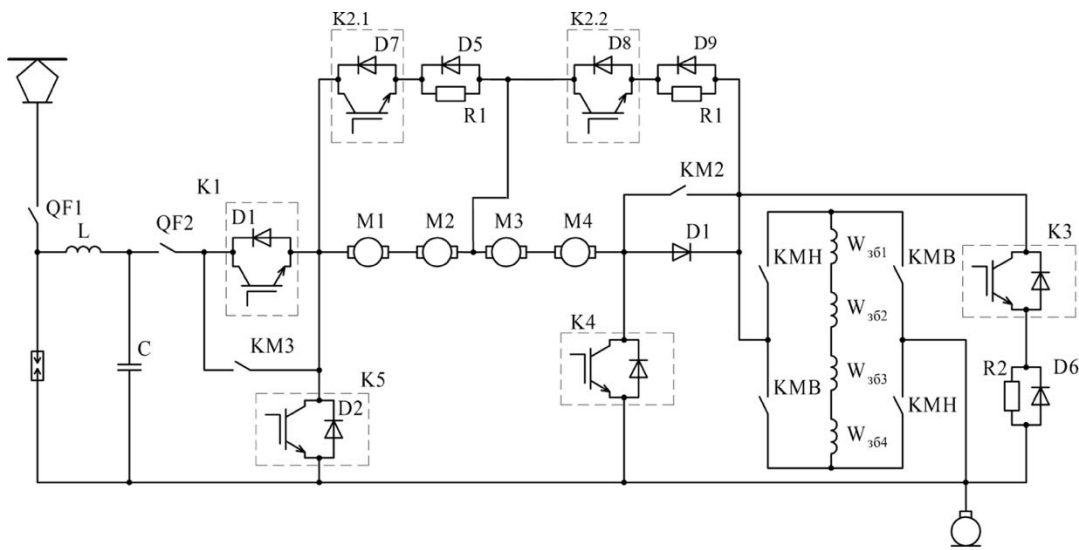


Рисунок 2 – Модернізована схема імпульсного управління ДПЗ

Алгоритм змінної структури формує в залежності від режиму роботи ДПЗ відповідні кола для проходження струму якоря на інтервалі модуляції:

а) режим пуску:

при ввімкненому ключі K1: $+U \rightarrow K1 \rightarrow M1 \div M4 \rightarrow D1 \rightarrow W_{зб} \rightarrow -U$;

при вимкненому ключі K1: $K1 \rightarrow M1 \div M4 \rightarrow D1 \rightarrow W_{зб} \rightarrow D2$;

при $i_{я} < i_{зб}$ існує коло діод $K4 \rightarrow D1 \rightarrow W_{зб} \rightarrow$ діод K4, що сприяє збільшенню струму збудження і відповідно моменту ДПЗ;

б) режим реостатного гальмування, джерелом живлення є ЕРС якоря двигунів $+E2 \rightarrow K2 \rightarrow R1 \rightarrow W_{зб} \rightarrow D2 - E2$. Характеристика відповідає класичній характеристиці реостатного гальмування ДПЗ із визначенням опором. Ключ K2 постійно включений;

в) режим гальмування з постійним моментом: $+E2 \rightarrow K2 \rightarrow R1 \rightarrow W_{зб} \rightarrow$ діод K4 $\rightarrow -E2$. Стан ключа $K2=1$, стан діода $D2=0$. При стані $K2=0$ існують кола: $+E_{я} \rightarrow M1 \div M4 \rightarrow$ діод K4 $\rightarrow -K4$ та діод K4 $\rightarrow D1 \rightarrow W_{зб} \rightarrow$ діод K4 при цьому $I_{D4}=I_{я}+I_{зб}$.

За умови $E_{я} > U$ можлива рекуперація енергії в мережу. При $U \geq U_{мах}$ вмикається ключ K5, що запобігає перевищенню напруги та створює коло для струму гальмування $+E2 \rightarrow K4 \rightarrow$ діод K4 $\rightarrow -E2$ та діод K4 $\rightarrow D1 \rightarrow W_{зб} \rightarrow$ діод D4. Гальмівна характеристика аналогічно ДПЗ незалежного збудження.

У третьому розділі проведено розробку комп'ютерних моделей модернізованої системи при роботі з ДПЗ з вказаними вище алгоритмами.

Дослідження проведено на базі ДПЗ типу 1ДТ-003.5У при прийнятих допущеннях: магнітна система ненасичена, не враховується реакція якоря, розподіл моменту двигунів рівномірний, характеристики напівпровідникових елементів ідеалізовані. Технічні характеристики двигуна $U=750$ В, $P=253$ кВт, $I_{н}=345$ А, $\omega=1250$ хв⁻¹, момент інерції двигуна та обертова частота моторного мотор візка $j=315$ Н·м, частота модуляції 400 Гц. Всі розрахунки наведені у відносних одиницях, за базові значення прийняті $M_{ем}=5$ кН, $\omega=130$ рад/с, $I_{н}=345$ А. Оскільки момент інерції практично не впливає на перебіг електромагнітних процесів, з метою зменшення часу моделювання прийнято $J=315$ Н·м.

Адекватність моделі була перевірена при моделюванні реостатного пуску ДПЗ.

На рис. 3 наведено комп'ютерну модель модернізованої схеми з імпульсним регулюванням ДПЗ у режимі пуску.

В дисертації наведено комп'ютерні моделі для кожного режиму роботи ДПЗ, що дозволяє спростити дослідження схеми зі зміною структурою. Моделі реалізовані в середовищі Matlab із застосуванням бібліотеки SimPowerSystem.

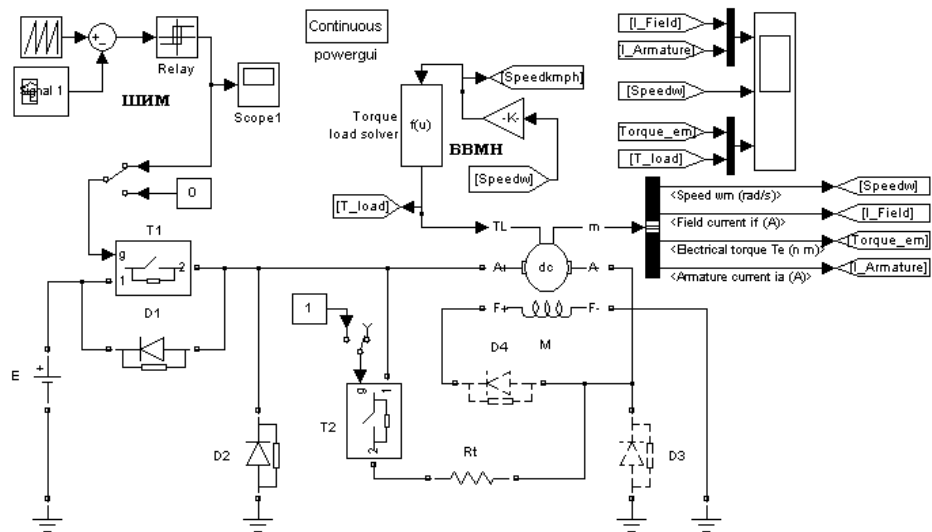


Рисунок 3 – Імітаційна модель модернізованої схеми імпульсного регулювання ДПЗ

Порівнювальні комп'ютерні діаграми класичної та модернізованої системи при пуску наведено на (рис. 4).

На рис. 5 показані експериментальні залежності, а саме середні значення електромагнітного моменту та частота обертання якоря потужності на експериментальному стенді.

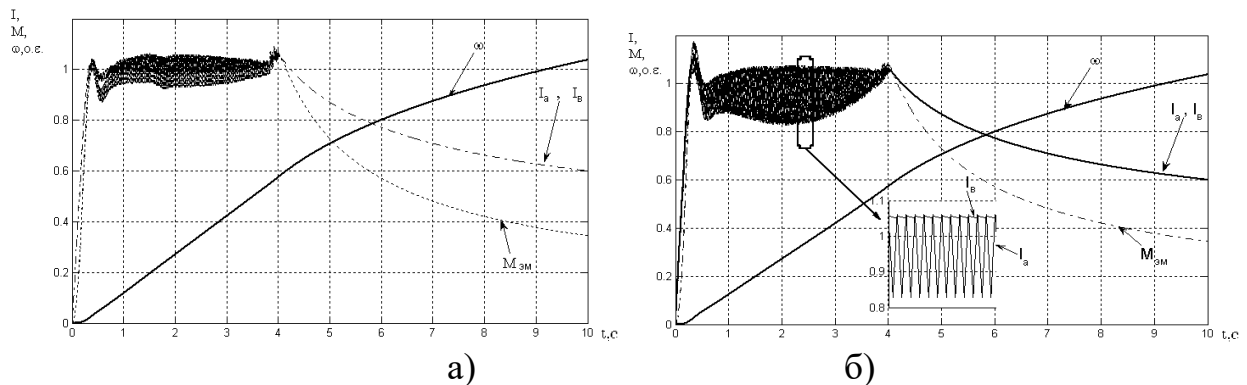


Рисунок 4 – Комп'ютерні діаграми пуску ДПЗ:
а) класична схема, б) модернізована схема

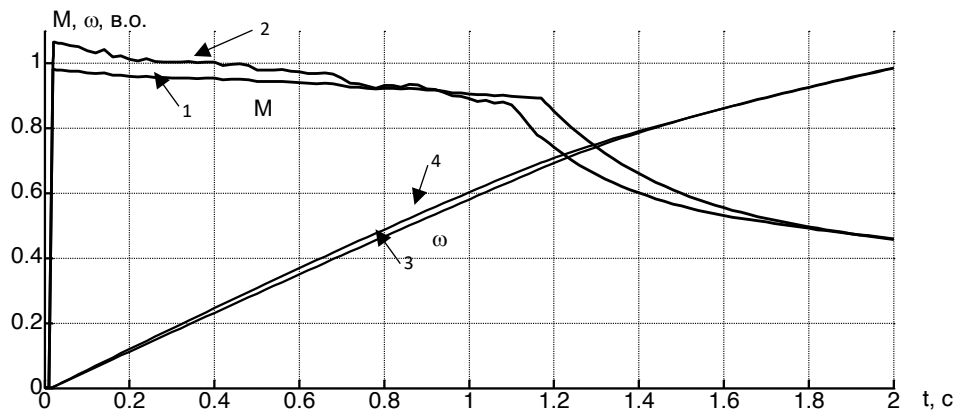


Рисунок 5 – Експериментальні залежності M_{cp} та ω :
1, 3 – класична схема; 2, 4 – модернізована схема

Аналіз рис. 4 та рис. 5 показує, що пульсації струму якоря у модернізованій схемі більші ніж у класичній, але пульсації струму збудження значно менші, а струм $I_{зб} \approx I_{яmax}$. Середній момент у модернізованій схемі при ненасиченій системі більше на 7%, а при насиченій системі - на 2%, що призводить до збільшення швидкості руху при пуску. Цей ефект досягається тим, що постійна часу якірного кола $T_я$ значно менше постійної часу обмотки збудження $T_{зб}$ ($T_{зб} \approx 8 \div 10 T_я$, $T_я = 0,04$ с).

На рис. 6 та 7 приведені діаграми комп'ютерного дослідження в режимі гальмування за алгоритмом, що забезпечує постійний струм гальмування з можливістю рекуперації енергії в мережу. При дослідженні було застосовано вхідний фільтр $L1=11,8$ мГн, $C1=150$ мкФ. Аналіз рис. 6 та рис. 7 показує, що схема забезпечує постійний струм якоря та електромагнітного моменту при гальмуванні від ω_n до $\approx 0,08 \cdot \omega_n$ з рекуперацією енергії в мережу і реостатну характеристику на кінцевій ділянці гальмування. Струм діода D2 сягає подвійного значення $I_я + I_{зб}$. Втрати енергії визначається залежністю

$$\Delta P = I_{зб}^2 \cdot R1 = U^2 \cdot \gamma^2 / R1. \quad (4)$$

Таким чином аналіз діаграм рис. 6 та рис. 7 підтверджує можливість реалізації гальмівних режимів ДПЗ аналогічних двигуну постійного струму з незалежним збудженням без допоміжних джерел живлення.

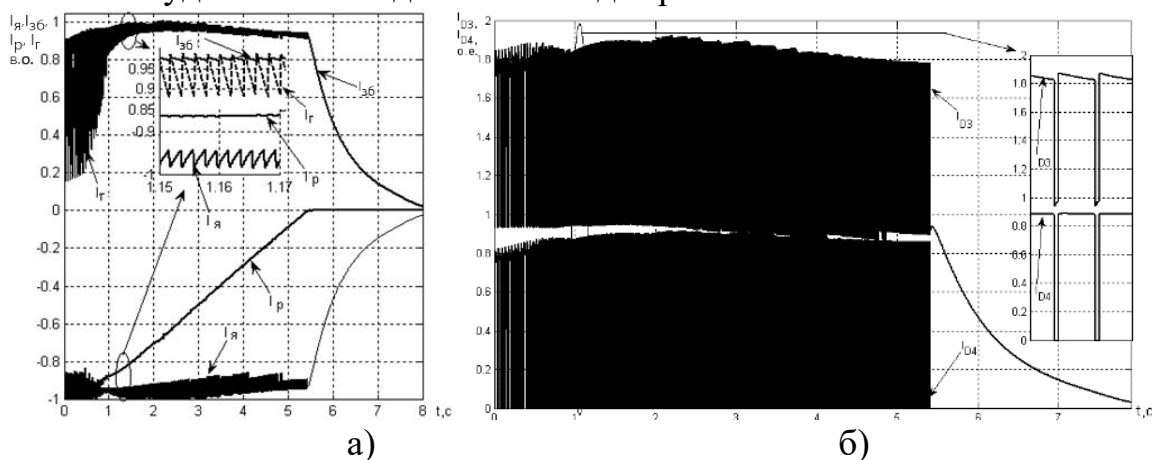


Рисунок 6 – Залежності для струмів: а) якоря $I_я$, збудження $I_{зб}$, рекуперації I_p та струму I_r в гальмівному резисторі R_1 , б) залежності струмів через діоди D3 та D4 при роботі схеми в режимі динамічного гальмування з рекуперацією енергії

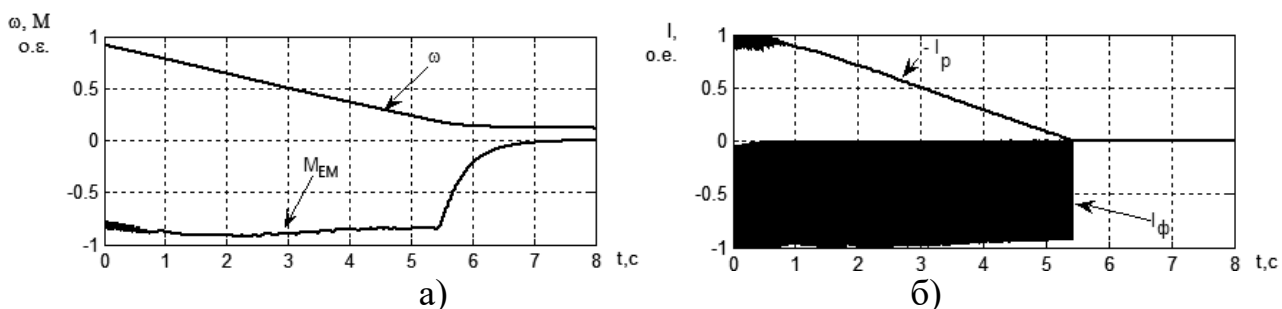


Рисунок 7 – Залежності: а) середнього значення електромагнітного моменту та кутової швидкості ДПЗ, б) струмів рекуперації I_p та I_{cp} вхідного C1L1-фільтра

На рис. 8 наведено результати комп'ютерного моделювання повного циклу режиму роботи ДПЗ з елементами відриву (короткочасного зниження напруги).

Аналіз рис. 8 показує, що схема забезпечує стійку роботу системи тяги при короткочасних до $0,5 \div 1$ с. перервах живлення у процесі руху за рахунок значної постійної часу обмотки збудження завдяки наявності допоміжних діодів, які шунтують обмотки.

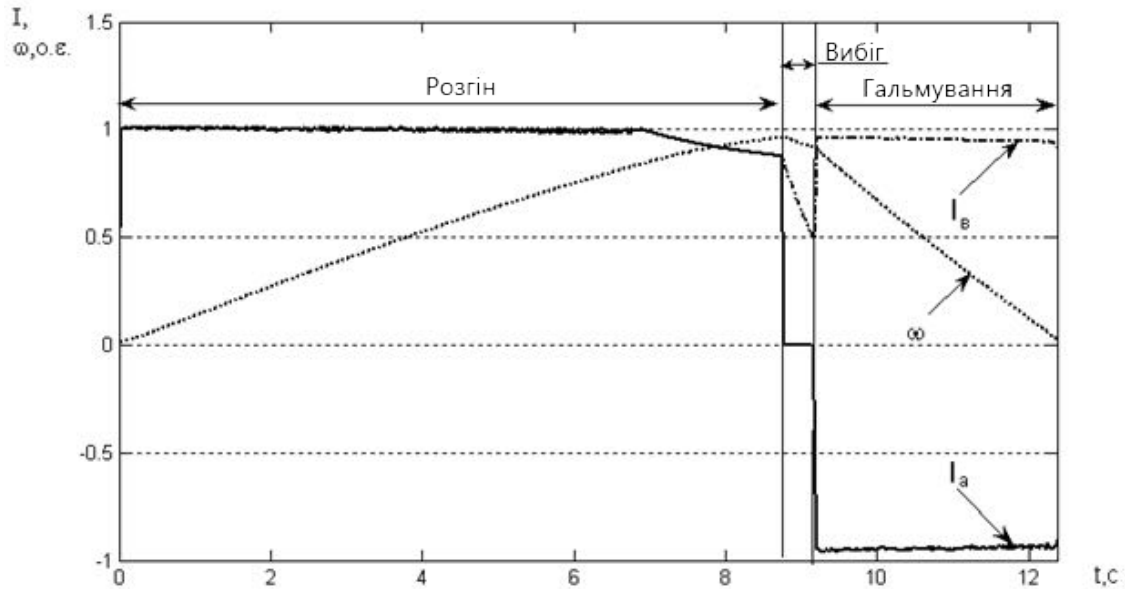


Рисунок 8 Комп'ютерна осцилограма режимів пуску, вибігу та гальмування ДПЗ ($f = 1500$ Гц)

Актуальною проблемою рухомого складу є захист від боксування, що підвищує силу тяги та, відповідно, економію енергії за рахунок більшого прискорення.

На рис. 9 та рис. 10 приведені принципова схема захисту від боксування та її імітаційна модель.

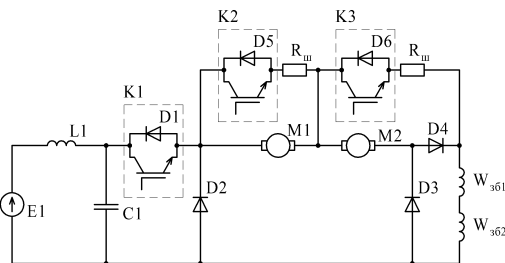


Рисунок 9 – Принципова схема реалізації захисту від боксування

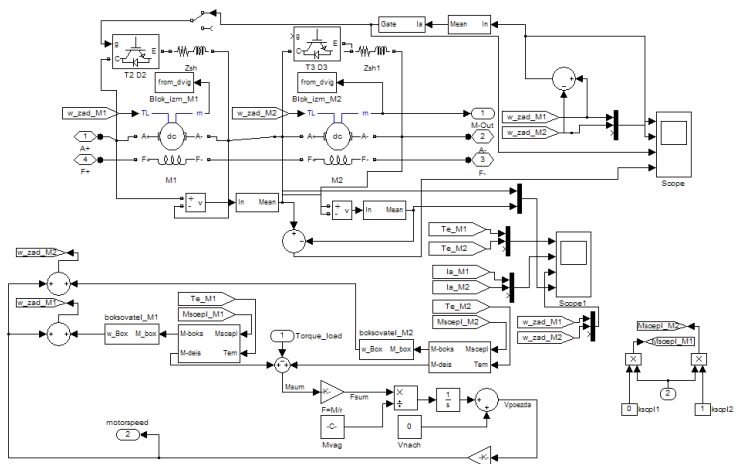


Рисунок 10 – Імітаційна модель дослідження режиму боксування

Дослідження проведено у відносних одиницях. За базові величини прийнято $I_H=370$ А, $U=1650$ В, коефіцієнт зчеплення $K_{scr}I_{nom}=0,35$.

Для припинення боксування колісної пари необхідно зменшити електромагнітний момент електродвигуна, який приводить її в рух. Для електродвигуна постійного струму при послідовній схемі включення електромагнітний момент буде прямопропорційним струму якоря. Отже, для зниження електромагнітного моменту достатньо знизити струм якоря електродвигуна. Для цього якір електродвигуна за допомогою силового ключа шунтується опором R_{sh} . Щоб оцінити вплив R_{sh} на зниження струму якоря з урахуванням дії проти-ЕРС E_1 тягового електродвигуна, розглянемо схему заміщення (рис. 11). Вплив E_1 і R_{sh}/R_a на струм якоря показано у вигляді поверхні (рис. 12). Дані представлені у відносних одиницях. За базові значення прийняті номінальний струм, опір обмотки якоря тягового електродвигуна.

Наведена залежність показує, що для забезпечення ефективної роботи схеми при пуску, а отже зниження струму якоря тягового електродвигуна і відповідно зниження його електромагнітного моменту, необхідно, щоб співвідношення R_{sh}/R_a знаходилося в межах від 0 до 0,2. Для гальмування з постійним струмом потрібно мати $R_{sh} \approx (1,5 \div 2,0) R_a$, тому відношення R_{sh}/R_a забезпечується щільністю роботи ключів К2 та К3.

Результати моделювання режиму рушання електропоїзду при зниженому коефіцієнті зчеплення колеса з рейкою і ввімкненою антибоксовальною системою наведені на рис. 13.

Як видно з рис. 13, струм якоря боксуючого двигуна спадає до значення $\approx 0,5 \cdot I_H$ протягом ≈ 3 періодів модуляції. Різниця частот обертання має пульсуючий характер. Відношення часу відхилення частот обертання до часу синхронного обертання приблизно дорівнює ≈ 1 .

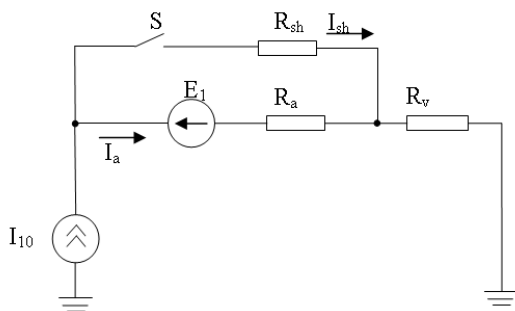


Рисунок 11 – Схема заміщення тягового електродвигуна при шунтуванні обмотки якоря

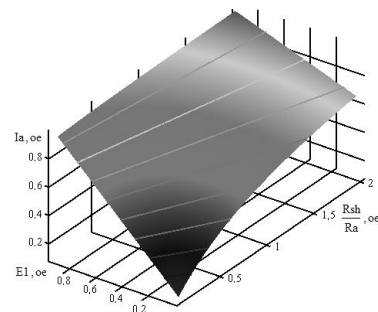


Рисунок 12 – Графічна залежність впливу проти-ЕРС двигуна E_1 і величини опору шунта R_{sh} на струм якоря I_a ДПЗ

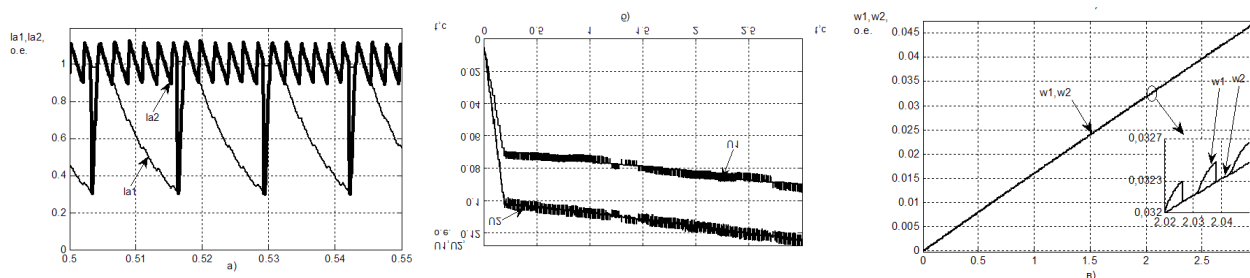


Рисунок 13 – Графічні залежності, що відображають результати моделювання режиму рушання електропоїзда при ввімкненій антибоксувальній системі ($k_{scpl1}=0.5$): а) струми якоря (I_{a1}) і (I_{a2}); б) падіння напруг на якорях (U_1) та (U_2); в) кутові швидкості обертання якорів (w_1) і (w_2) тягових двигунів М1 та М2 відповідно

На рис. 14 побудовані залежності відносної різниці частоти обертання $\omega_1^* - \omega_2^* = f(k_{scpl1})$ (рис. 14,а), відносної різниці напруг $U_1^* - U_2^* = f(k_{scpl1})$ (рис. 14,б).

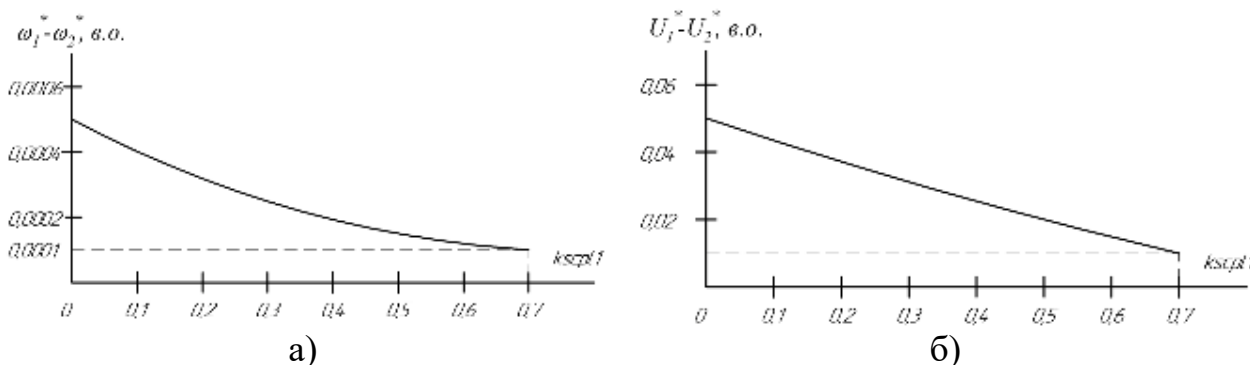


Рисунок 14 – Залежності $\omega_1 - \omega_2$, $u_1 - u_2$ відносно значень коефіцієнту зчеплень

Швидкість спадання струму в цьому колі буде визначатися значенням активного опору, включеного послідовно з шунтуючим ключем і постійної часу якоря ТЕД. Вказаний алгоритм роботи дає можливість запобігати виникненню боксування колісних пар з достатньо високою швидкістю. Відносна частота обертання змінюється у межах $0,06 \div 0,01\%$ при зміні коефіцієнту зчеплення $k_{scpl1} = 0 \div 0,7$ відповідно.

У четвертому розділі розглянуті перспективні напрямки модернізації тягових передач та перетворення живлення власних потреб. Сучасна тенденція використання тягових частотно регульованих електроприводів (ЧРП) пов'язана зі зменшенням експлуатаційних втрат, а саме важливе, зі зменшенням маси ТЕД, що виправдовує більш високу вартість ЧРП.

Сучасний технічний стан електропоїздів та економічні умови в Україні вимагають пошуку відповідних технічних рішень для реалізації модернізації.

У роботі показані перспективні напрямки підвищення ККД тягових приводів з ЧРП та ДПЗ, наведені результати порівняння та їх аналіз.

Показано, що впровадження ЧРП економічно доцільно при побудові швидкісних ЕП з швидкістю більше 120 км/год, де основні переваги мають масо-габаритні показники та експлуатаційні витрати. Аналіз складових ККД показує,

що традиційний ЧРП з трифазним АД має вищий ККД у порівнянні з ДПЗ при потужності на валу 235÷240 кВт близько на 1,9% (див. табл.1). Однак дослідження українських вчених показують, що використання шестифазних обмоток або двохобмоткових АД мають підвищити їх ККД приблизно на 1%, у той час як використання несиметричних компенсованих обмоток у ДПЗ приводить до збільшення ККД на $\approx 3\%$.

Ця обставина робить ККД вказаних двигунів приблизно однаковим, що знімає один із основних недоліків ДПЗ з імпульсним регулюванням. Порівняльний аналіз характеристик двох систем тягового електроприводу наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри порівняльного аналізу тягових електропередач для моторного вагону

| № п/п | Схема передачі Параметр | Модернізована з ДПЗ (рис.2.9) | Частотно-регульований АД (рис. 4.1) |
|-------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | Тип двигуна | 1ДТ-003.5У | АД-906У1 |
| 2 | Номінальна потужність, кВт | 235 | 240 |
| 3 | Номінальна напруга живлення, В | 3000 | 3000 |
| 4 | Номінальний струм, А | 235 | 4x80 |
| 5 | Кількість двигунів, одиниць | 4 послідовно | 4 паралельно |
| 6 | Кількість перетворювачів, одиниць | 1 | 1 |
| 7 | Клас напівпровідникових приладів | 60 | 60 |
| 8 | Кількість IGBT модулів, одиниць | 6 | 7 |
| 9 | Кількість додаткових діодів, одиниць | 2 | 1 |
| 10 | Маса двигуна, кг | 4x2300 | 4x1600 |
| 11 | ККД двигуна, % | 91,5 | 93,4 |
| 12 | ККД модернізованих двигунів, % | 94,0÷94,5% | 94,4÷95% |

Порівняльні дослідження інтегральних ККД приводів з ЧРП та ДПЗ (двигунів АДДТ-305 та ДПЗ ЕДУ-133 на тепловозі 2000 кВт) показують, що ККД АД в експлуатації завжди менші ККД ДПЗ. При потужності 300 кВт його інтегральний ККД буде на 5% нижче за ККД тягового ДПЗ.

Враховуючи все вище сказане найбільш доцільнішим є використання у тяговому ЧРП двохобмоткових тягових АД, що дозволяє покращити не тільки ККД, а й використовувати напівпровідникові модулі IGBT вдвічі меншого класу, враховуючи досвід розробки в Україні тягового перетворювача частоти з тяговою ЧРП дизель потягу ДЕЛ-02 (Р= 300 кВт, типу 2ТП МПЧ-2ТП-200-1,15к-110 У4).

Використання двохобмоткових двигунів дозволяє при використанні IGBT 60 кл реалізувати двосистемний з живленням від мережі 3-6 кВ, або односистемний при живленні від мережі 6 кВ.

Таким чином для модернізації існуючих ЕП або розробки нового ЕП з ЧРП або з ДПЗ потрібна модернізація двигунів та розробка перетворювачів, а для

тягових АД тягової передачі додатково знадобиться модернізація моторного візка. Припускаючи, що вартість модернізації тягових двигунів та розробка перетворювачів однакова, то доцільність використання ЕП з ДПЗ буде визначатись співвідношенням різниці вартості модернізації електропередачі моторних візків та експлуатаційних втрат. При відсутності модернізації двигунів перевагу за інтегральним ККД будуть мати ДПЗ. Тому для модернізації існуючих ЕП при швидкості до 120 км/год з урахуванням режиму приміського руху рекомендується модернізована схема імпульсного регулювання обертання ДПЗ. Тягова електропередача з ЧРП рекомендується для швидкісного руху, де суттєву перевагу має зменшення ваги АД, що суттєво знижує зусилля на парі колесорейка. Враховуючи необхідність зниження вартості перетворювачів удосконалено методику порівняння напівпровідникових модулів за показником якості $P_{я}$, яка враховує розрахункові або експлуатаційні параметри системи напівпровідник-охолоджувач на відміну від прийнятої методики порівняння за тестовими значеннями рекомендованими виробниками модулів.

Показник якості $P_{я\Sigma}$ має вираз $P_{я\Sigma} = \frac{T_{jmax}^*}{125} \cdot \frac{I_c}{I_{cmax}} \cdot \frac{T_c}{T_{jmax}} \cdot \frac{I_{cном}}{P_{sat}+P_{com}}$, де T_{jmax}^* ,

T_{jmax} , T_c – температура тестування виробника, максимальна температура напівпровідникової структури, основи приладу при тестуванні відповідно;

I_c , I_{cmax} – струм при тестуванні, максимальний відповідно.

P_{sat} , P_{com} – втрати енергії при ввімкненому стані та при комутації.

Проведено аналіз модулів провідних іноземних виробників напругою 1700÷6500 В з $I_{ном} = 800 \div 600$ А, при частоті комутації до 2000 Гц.

Показано, що при модернізації електропередачі доцільно провести і модернізацію джерел живлення власних потреб, яка є складовою електропривода, і для яких в існуючих ЕП використовується електромеханічний перетворювач 1.ПВ.6 (1.ПВ.7), при потужності навантаження 38 кВт з ККД 63% він споживає з мережі 50 кВт, тому заміна його напівпровідниковим перетворювачем дозволяє підвищити ККД до 90-95%, що в свою чергу дасть змогу без збільшення споживання потужності з мережі підвищити корисну потужність власних потреб на 7-10 кВт (27÷33%), за рахунок чого підвищити комфортність у секції салонів, зменшити шум та вібрації, реалізувати додаткове охолодження повітря.

Використання е-трансформатора як джерела живлення може розглядатись як етап створення е-трансформаторів для модернізації тягових електропередач.

Розглянуто схеми та алгоритми побудови перетворювача власних потреб при коливаннях вхідної напруги тягової мережі. В результаті аналізу рекомендовано каскадну схему зі стабілізацією напруги перед кожним каскадом (рис.15). Алгоритм дозволяє оптимізувати параметри трансформатора за масою, встановлена потужність, яких дорівнює номінальному режиму, а саме у тричі менше ніж при алгоритмах без стабілізації вхідної напруги. Наявність ключа К1 дозволяє шунтувати аварійний інвертор, й, відповідно, забезпечувати роботу перетворювача при виході з ладу одного з інверторів.

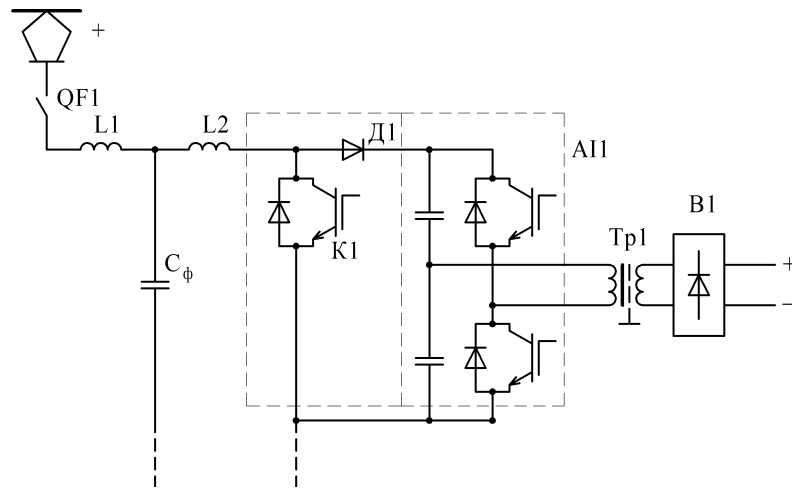


Рисунок 15 – Схема каскаду зі стабілізацією вхідної напруги

Проведено дослідження на комп'ютерній моделі теплових режимів роботи ключів силового модуля імпульсного регулятора власних потреб з параметрами: напруга на вході $U_{вх}$ від 0 до 1500 В, на виході 600 В, потужність 60 кВт. У якості охолоджувача вибрано радіатор ВЕРТ-0,5 для якого побудовано залежності теплового опору від швидкості руху охолоджуючого повітря (рис.16).

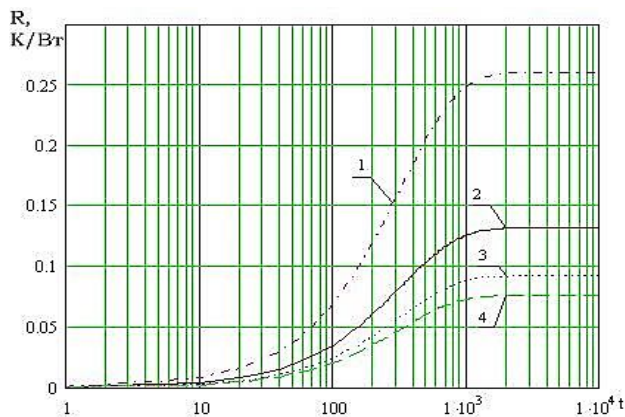


Рисунок 16 – Тепловий опір радіатора ВЕРТ-05 $R_T=f(t)$ для швидкостей руху охолоджуючого повітря: 1 – 0 м/с, 2 – 3 м/с, 3 – 6 м/с, 4 – 9 м/с

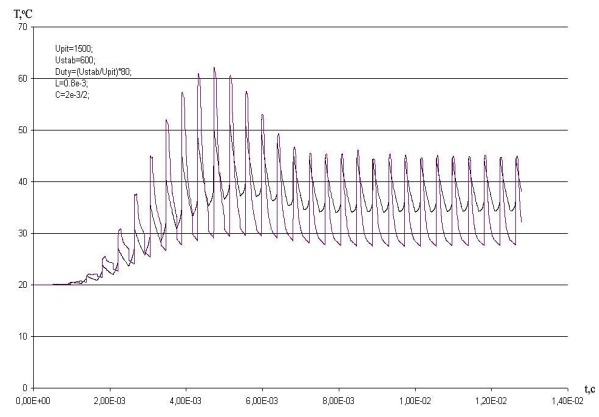


Рисунок 17 – Температура структури силового транзистора Т1 і діода зворотного струму V1

Дослідження проводилися на випробувальній ділянці ТОВ НДІ «Перетворювач» у силовому імпульсному блоці дослідного перетворювача власних потреб дизель потягу ДЕЛ-02 типу МПЧ-П2ТП-43.

Заміряна температура корпусу модуля експериментального зразку при температурі 45°C становить 65°C , що підтверджує достатню точність моделювання.

Працездатність модернізованої схеми імпульсного регулювання частоти обертання ДПЗ перевірена на спеціальному стенді з ДПЗ потужністю $P_H=3,8$ кВт, $U_H=220$ В. Загальний вигляд стенду показано на рис. 18.



Рисунок 18 – Фото спеціального стану імпульсного перетворювача

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-прикладна задача пов'язана з підвищенням ефективності тягової електропередачі електропоїздів постійного струму, що полягає у розробці схеми та алгоритмів імпульсного керування двигунами постійного струму з послідовним збудженням, яка без допоміжних джерел живлення дозволяє отримати динамічні та статичні характеристики аналогічні двигунам з незалежним збудженням та призводить до збільшення пускового моменту, зменшення собівартості перетворювача для тягової електропередачі.

1. Аналіз технічної літератури та сучасного стану тягових електропередач електропоїздів постійного струму показав, що використання сучасних напівпровідникових приладів дозволяє суттєво покращити статичні та динамічні характеристики, енергетичні та надійнісні показники електричного рухомого складу, тому питання з покращення вартісних та енергетичних показників тягового електропередачі поїздів є актуальними. Показано, що сучасний стан електропоїздів, що експлуатується в Україні має значний знос до 90% та застарілі технічні рішення тягової електропередачі, що призводить до значних енергетичних та експлуатаційних втрат. З урахуванням економічного стану проблема підвищення надійності та енергоефективності вирішується шляхом часткової модернізації при капітальних ремонтах рухомого складу та частковим впровадженням в експлуатацію нових електропоїздів з сучасними рішеннями по тяговій електропередачі, та систем живлення власних потреб.

2. Розроблено енергоефективну схему імпульсного регулювання модернізованого тягового електроприводу постійного струму. Показано, що реалізація високоефективних режимів роботи досягається безконтактною зміною структури силових кіл на періоді модуляції струмів якоря або збудження, та виявлені особливості струмового навантаження допоміжних діодів.

3. Розроблені нові алгоритми та імітаційні моделі, які дозволяють досліджувати електромеханічні процеси у модернізованій схемі імпульсного керування двигуном послідовного збудження, що дозволило у результаті порівняльного аналізу існуючих та модернізованої схеми показати перевагу

останньої у збільшенні моменту на 7-5% в залежності від стану магнітної системи, що підтверджено експериментальними дослідженнями.

4. Встановлено, що модернізована схема імпульсного регулювання, на відміну від існуючих, дозволяє проводити динамічне гальмування з номінальним моментом на валу тягового двигуна при швидкості обертання якоря до 8% від номінальної. Розроблено та досліджено на комп'ютерній моделі схему захисту від боксування та отримані нові залежності параметрів двигунів від коефіцієнту зчеплення коліс з рейками. Показано, що схема має високу швидкодію, яка сягає 4-20 періодів модуляції при різниці швидкості обертання двигунів 0,06% від номінальної.

5. Проведено аналіз перспективних схем побудови тягової передачі змінного струму для тягових мереж 3-6 кВ, та надані рекомендації до їх побудови.

5.1. Показана можливість підвищення ККД тягових асинхронних двигунів та двигунів постійного струму за рахунок виконання шестифазних та несиметричних компенсаційних обмоток, відповідно. Показано, що номінальний ККД обох двигунів може бути практично однаковим 94-95%. Відмічено, що інтегральний ККД у режимах руху характерного для приміських електропоїздів у передачах з двигуном послідовного збудження приблизно на 3-5% вище ніж у приводах з АД при частотному регулюванні.

5.2. Оскільки кількість та встановлена потужність напівпровідникових приладів для тягових передач змінного та постійного струму практично однакові, ефективність впровадження модернізованої схеми (з урахуванням модернізації двигунів) визначається співвідношенням витрат на експлуатацію колекторів ДПЗ та економії електроенергії з урахуванням інтегрального ККД тягової передачі постійного струму.

5.3. З огляду на економічний стан в Україні тягова передача з модернізованою схемою та двигуном постійного струму може бути рекомендована для модернізації існуючого складу приміських електропоїздів постійного струму при швидкості руху до 120 км/год. Тяговий привод з асинхронним двигуном з урахуванням необхідності розробки (модернізації) нового моторного візка рекомендується для побудови електропоїздів швидкісного руху зі швидкістю біля 120 км/год і вище та при живленні від мереж у діапазоні напруг 3-6 кВ.

5.4. Проаналізовані перспективні схеми, алгоритми роботи та надані рекомендації по побудові схем перетворювачів власних потреб, що дадуть збільшити корисну потужність на 27÷33%.

6. Розроблено експериментальний стенд з ДПЗ потужністю 3,8 кВт $U_n=220V$, на якому перевірено працездатність розробленої модернізованої схеми імпульсного регулювання швидкості обертання ротора ДПЗ та його механічних характеристик. Розроблено імітаційну модель для дослідження теплових режимів з урахуванням реальних профілів охолодження напівпровідникових приладів, та проведено аналіз теплових режимів і перевірку результатів на реальному зразку перетворювача типу МПЧ-П2ТП на стендах ТОВ НДІ «Перетворювач».

7. Розроблена модернізована схема та рекомендації роботи впроваджені у ТОВ «НДІ «Перетворювач» (м. Запоріжжя) при реалізації проектів модернізації електровозів ЧМ1, електроприводів переміщення 60-тонного мостового крану Алчевського меткомбінату та перетворювача живлення власних потреб типу МПЧ-П2ТП-У3 для дизель-потягу ДЕЛ-02, а також використовуються в освітньому процесі Національного університету «Запорізька політехніка» при підготовці фахівців за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти.

Таким чином: досягнута поставлена мета, а саме розроблена енергоефективна модернізована схема електропередач з двигуном постійного струму послідовного збудження з формуванням динамічних та статичних характеристик аналогічним двигунам незалежного збудження без допоміжних джерел живлення, що покращує їх вартісні, енергетичні та моментні характеристики.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

Статті у міжнародних виданнях та у виданнях, які включено до науково-метричних баз:

1. Leoshchenko S., Oliinyk A., Subbotin S., Shylo S., Shkarupylo V. (2019). Method of artificial neural network synthesis for using in integrated CAD // 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM 2019) : proceedings. – 2019. – No. 8779248. – P. 24–29. – DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779248. – (Scopus, Web of Science) (*Особисто здобувачем: розроблено та адаптовано систему тестування модифікованого генетичного алгоритму*).

2. Korotun A., Moroz H., Titov I., Reva V., Shilo S. Optical properties of the ensembles of the spherical nanoparticles, embedded into the thin-film solar cell // 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO 2024) : proceedings. – 2024. – ISBN 979-835036817-8. – ISSN 2377-6935. – DOI: 10.1109/ELNANO63394.2024.10756911. – (Scopus) (*Особисто здобувачем: розроблена методика розрахунку частотних залежностей випромінювальної ефективності, коефіцієнтів поглинання, розсіювання та відбивання*).

Статті у фахових виданнях України:

3. Жорняк Л. Б., Каплієнко О. О., Шило С. І. Застосування теорії розмірностей до опрацювання експериментальних даних під час температурних досліджень електричних апаратів // Електротехніка та електроенергетика. – 2002. – № 1. – С. 41–47. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (*Особисто здобувачем: запропонована методика застосування системи обробки даних при обробці температурних режимів роботи електричних апаратів*).

4. Жорняк Л. Б., Каплієнко О. О., Шило С. І. Програма визначення часових параметрів нагріву комплектних пристроїв під час прискорених теплових випробувань // Електротехніка та електроенергетика. – 2003. – № 2. – С. 51–54. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). (*Особисто здобувачем:*

розроблено програмне забезпечення визначення параметрів нагрівання при теплових випробуваннях).

5. Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О. Дослідження теплових режимів роботи силового модуля імпульсного стабілізатора напруги // Вісник КДПУ. – 2006. – № 4. – С. 85–88. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: розроблена методика моделювання роботи перетворювача в режимі реального часу з врахуванням теплових режимів роботи кристалів силового модуля).*

6. Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О., Немудрий І. Ю. Дослідження динаміки серієсного електродвигуна з різними імпульсними схемами регулювання // Електротехніка та електроенергетика. – 2007. – № 1. – С. 4–8. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: запропонована модернізована схема тягової передачі з ДПЗ, яка відрізняється від класичної включенням допоміжного діоду у сумісне коло якоря та обмотки збудження, та імітаційна модель нової схеми).*

7. Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко А. О., Немудрий І. Ю. Дослідження перехідних режимів під час послідовного з'єднання серієсних електродвигунів постійного струму // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. – № 1. – С. 10–16. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: розроблена ефективна система керування для режиму боксування колісних пар, яка базується на удосконаленій схемі регулювання струму тягових двигунів).*

8. Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О., Шевченко Н. М. Дослідження реостатно-рекуперативного гальмування у системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 2. – С. 6–9. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: розроблена імітаційна модель, яка дозволяє проводити дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів в двигуні постійного струму з послідовним збудженням в режимі динамічного гальмування та визначено вимоги до граничних параметрів роботи елементів схеми).*

9. Андрієнко П. Д., Шило С. І., Каплієнко О. О. Дослідження динамічних режимів електродвигуна послідовного збудження з імпульсними схемами регулювання електроприводу // Електротехніка та електроенергетика. – 2016. – № 2. – С. 51–58. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar та ін.). *(Особисто здобувачем: розроблені імітаційні моделі, які дозволяють досліджувати електромеханічні процеси в двигуні постійного струму з послідовним збудженням).*

10. Василевський В. В., Каплієнко О. О., Шило С. І. Застосування нейронних мереж для прогнозування вологості ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів // Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2019. – № 2. – С. 8–12. – DOI: 10.20998/2079-3944.2019.2.02. – (Index Copernicus, DOAJ, Google Scholar, Crossref та ін.). *(Особисто здобувачем: запропоновано використання методу нейромереж для прогнозування стану вологості ізоляції лінійних (масляних)*

трансформаторів, що забезпечує його ремонт не за жорстким графіком, а згідно з дійсним станом ізоляції).

11. Андрієнко Д. С., Шило С. І. Оцінка доцільності використання напівпровідникових перетворювачів для живлення власних потреб електропоїздів постійного струму // Економічний аналіз. – 2024. – Т. 34, № 3. – С. 447–453. (*Особисто здобувачем: визначено базові критерії оцінки можливості заміни електромашинних перетворювачів на напівпровідникові; запропоновано використання уніфікованих рішень при модернізації електропоїздів та електропотягів постійного струму).*

Тези і матеріали наукових конференцій:

12. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., Шило С. І. Дослідження режимів гальмування у системі імпульсного регулювання серієсного електродвигуна при низьких частотах обертання // Енергозбереження на залізничному транспорті : матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 30 травня – 02 червня 2012 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2012. – 82 с. – С. 3. (*Особисто здобувачем: застосована імітаційна модель, яка дозволяє проводити дослідження електромагнітних і електромеханічних процесів в двигуні постійного струму з послідовним збудженням в режимі динамічного гальмування при низьких частотах обертання).*

13. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., Шило С. І., Немудрий І. Ю. Порівняльний аналіз схемних рішень стабілізованої тягової підстанції постійного струму // Електрифікація транспорту «Транселектро 2009» : матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (Місхор, 03–05 червня 2009 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2009. – 77 с. – С. 26. (*Особисто здобувачем: проведено аналіз і порівняння характеристик схемних рішень).*

14. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., Шило С. І. Аналітичний опис електромеханічних процесів вдосконаленої схеми імпульсного регулювання двигуна постійного струму послідовного збудження // Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО–2010» : матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції (Місхор, 27–30 вересня 2010 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2010. – 124 с. – С. 5. (*Особисто здобувачем: розроблено аналітичний опис електромеханічних процесів вдосконаленої схеми імпульсного регулювання).*

15. Шило С. І. Покращення електромеханічних характеристик серієсних електродвигунів засобами силової електроніки // Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (Воловець, 11–13 червня 2014 року). – Дніпро : ДНУЗТ, 2014. – 181 с. – С. 161–162.

16. Андрієнко П. Д., Каплієнко О. О., Шило С. І., Немудрий І. Ю. Імітаційна модель «Тягова підстанція – електрорухомий склад постійного струму» // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті (EMC&S–R) : тези IV Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпропетровськ, 15–19 лютого 2009 року). – Дніпро : ДПТ, 2011. – 98 с. – С. 8–9. (*Особисто здобувачем: проведено моделювання на розробленій моделі).*

17. Шило С. І. Швидкодіюча система захисту від боксування двигунів послідовного збудження // Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми ресурсозбереження в промисловості та на транспорті»: матеріали конференції (23–25 жовтня 2024 року, м. Харків). – Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2024. – 137 с. – С. 57–60.

АНОТАЦІЯ

Шило С.І. Підвищення ефективності тягової передачі електропоїздів постійного струму. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) спеціальністю 05.22.09 – Електротранспорт (275 Транспортні технології (за видами)) Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту Українського державного університету науки і технологій, – Дніпро, 2025.

У дисертації вирішено науково-практичну задачу щодо підвищення ефективності тягової електропередачі електропоїздів постійного струму шляхом розробки та дослідження нової схеми імпульсного керування тяговими двигунами з послідовним збудженням, що забезпечує характеристики, аналогічні двигунам з незалежним збудженням, без використання додаткових джерел живлення. З урахуванням високого рівня зношеності (до 90%) та застарілих технічних рішень електропоїздів, що експлуатуються в Україні, модернізація тягової передачі є важливим завданням для зниження енергетичних та експлуатаційних втрат. Запропонована схема імпульсного регулювання забезпечує підвищення моменту тягових двигунів на 5-7% залежно від стану магнітної системи, а також дозволяє реалізувати динамічне гальмування з номінальним моментом при швидкості обертання якоря до 8% від номінальної. Розроблено та досліджено алгоритм захисту від боксування. Встановлено, що схема має високу швидкодію (4-20 періодів модуляції) при різниці швидкості обертання двигунів 0,06% від номінальної. Проаналізовано шляхи підвищення ККД тягових двигунів. Досліджено схеми перетворювачів живлення власних потреб. Надані рекомендації щодо модернізації тягових передач та розробки енергоефективних тягових електропередач і перетворювачів живлення власних потреб електропоїздів постійного струму.

Ключові слова: імпульсний перетворювач, тяговий двигун, постійний струм, послідовне збудження, паралельне збудження, частота обертання, комп'ютерна модель, фізична модель, асинхронний двигун, напівпровідниковий прилад.

ABSTRACT**Shylo S.I. Improving the Efficiency of Traction Transmission in DC Electric Trains. – Manuscript.**

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences (Doctor of Philosophy) in the specialty 05.22.09 – Electric Transport (275 Transport Technologies (by type)) Dnipro Institute of Infrastructure and Transport Ukrainian State University of Science, – Dnipro, 2025.

The thesis addresses a significant scientific and practical challenge related to improving the efficiency of traction power transmission in DC electric trains. The study focuses on the development and research of a new efficient pulse control scheme for traction transmission, which enables the formation of static and dynamic characteristics of traction motors with series excitation like those of separately excited motors, without the need for auxiliary power sources.

Considering the current state of electric trains in Ukraine, where up to 90% of the fleet experiences excessive wear and relies on outdated traction power systems, modernization is crucial for reducing energy and operational losses. Considering the economic conditions, the issue of improving reliability and energy efficiency is addressed through partial modernization during major overhauls of rolling stock and the phased introduction of new electric trains with modern traction and onboard power supply systems.

The study introduces energy-efficient pulse control schemes for series-wound DC motors. It is shown that the realization of high-efficiency operating modes is achieved by contactless restructuring of the power circuits during the modulation of the armature or excitation currents, with special attention to the current load of auxiliary diodes.

The developed simulation models allow for an in-depth analysis of electromechanical processes in the modernized pulse control system for series-wound DC motors. A comparative analysis of existing and improved schemes has confirmed the advantages of the proposed system, including a torque increase of 5-7%, depending on the state of the magnetic system, as validated by experimental research. It has been found that, unlike existing solutions, the modernized pulse control scheme enables dynamic braking with a nominal torque on the traction motor shaft at armature speeds as low as 8% of the nominal value.

Additionally, an algorithm for a wheel slip protection system was developed and tested using computer simulations. The study presents new dependencies of motor parameters on the adhesion coefficient between wheels and rails. The results confirm that the system ensures a high response speed, reaching stability within 4-20 modulation cycles, with a slip velocity difference of only 0.06% of the nominal value.

The thesis also explores methods to improve the efficiency of both asynchronous and DC traction motors. It is shown that the use of six-phase windings and asymmetric compensation windings can increase the nominal efficiency of both types of motors to approximately 94-95%. From an economic perspective, the modernized DC traction system is recommended for electric commuter trains operating at speeds up to 120 km/h, especially where gradual modernization of existing rolling stock is preferable. For high-speed trains exceeding 120 km/h, an asynchronous traction drive

with frequency control is recommended due to its advantages in weight reduction and traction force optimization.

The thesis also provides a comprehensive analysis of promising auxiliary converter designs, investigating different circuit topologies and their performance under fluctuating traction supply conditions. A new simulation model was developed to study the thermal regimes of semiconductor devices, incorporating real cooling profiles. The results were verified with experimental data obtained from prototype tests.

Recommendations have been provided for the design of traction transmissions during modernization and for the development of future energy-efficient traction transmissions and auxiliary power supply converters for DC electric trains. The proposed methodologies and simulation tools can be applied to future research in electric transport systems, ensuring continuous improvements in energy efficiency and reliability.

Keywords: pulse converter, traction motor, direct current, series excitation, parallel excitation, rotation frequency, computer model, physical model, asynchronous motor, semiconductor device.