

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**

**Яровий Роман Олександрович**

**УДК 629.4.016**

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАНЕВРОВИХ ТЕПЛОВОЗІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ  
КОМБІНОВАНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ**

**Спеціальність 05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів**

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

**Сєвєродонецьк – 2019**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі логістичного управління та безпеки руху на транспорті Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор  
Чернецька-Білецька Наталія Борисівна,  
Східноукраїнський національний університет  
імені Володимира Даля, завідувач кафедри  
логістичного управління та безпеки руху на  
транспорті Міністерства освіти і науки  
України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Фалендиш Анатолій Петрович,  
Український державний університет залізничного  
транспорту, завідувач кафедри теплотехніки,  
теплових двигунів та енергетичного менеджменту  
Міністерства освіти і науки України;

кандидат технічних наук, доцент  
Черняк Юрій Васильович,  
Державний університет інфраструктури та  
технологій, доцент кафедри тягового рухомого  
складу залізниць Міністерства освіти і науки  
України.

Захист відбудеться «07» грудня 2019 р. об 11.30 годині на виїзному засіданні спеціалізованої вченої ради Д 29.051.03 в Східноукраїнському національному університеті імені Володимира Даля за адресою: 03049, м. Київ, вул. Івана Огієнка, 19, Державний університет інфраструктури та технологій, аудиторія 209.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля за адресою: 93406, м. Северодонецьк, пр. Центральний, 59-а.

Автореферат розісланий «06» листопада 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 29.051.03

О.С. Ноженко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність роботи.** Відповідно до основних завдань комплексної програми оновлення залізничного рухомого складу України до 2020 року передбачено оновлення тягового рухомого складу шляхом створення та впровадження локомотивів нового покоління та модернізації наявних для доведення їхніх експлуатаційних показників до рівня сучасних вимог.

Одним із важливих напрямів модернізації силових установок маневрових тепловозів є використання накопичувачів енергії. Основною метою такої модернізації є накопичення енергії електродинамічного гальмування та подальше її використання на автономну тягу тепловоза. Використання накопичувачів дозволяє зменшити витрати енергетичних ресурсів на тягу поїздів, стабілізувати режим роботи теплових двигунів, за рахунок чого збільшити їх моторесурс, зменшити кількість шкідливих викидів, зменшити знос пневматичної гальмівної системи за рахунок використання електродинамічного гальмування.

Існує великий досвід застосування накопичувачів енергії в транспортному комплексі, як у сфері електричного, так і гібридного транспорту. Але відомі роботи, виконані різними науковими школами, містять рішення окремих завдань або результати загальних теоретичних досліджень, але не містять даних комплексних досліджень взаємозв'язків між параметрами комбінованого накопичувача енергії та типами маневрових робіт. На сьогодні не існує однозначного рішення щодо типу, параметрів та місця установки накопичувача енергії (НЕ) на маневрових локомотивах. Це пов'язано з тим, що різні маневрові роботи потребують різних накопичувачів енергії як за ємністю, так і за складом. Таким чином, особливої актуальності набуває науково-практичне дослідження, спрямоване на удосконалення методів і моделей, визначення техніко-економічних накопичувачів енергії для маневрових тепловозів, що дозволить максимально ефективно покращити їхні експлуатаційні характеристики.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тема дисертації відповідає «Комплексній програмі оновлення залізничного рухомого складу України на 2008-2020 роки», яку затверджено Наказом Міністра транспорту та зв'язку України від 14.10.2008 р., №1259, Державній цільовій програмі реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, затвердженій розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 року №1390 та Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року, яку схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 року №1555-р. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до науково-дослідних робіт за темами: «Розробка методології модернізації маневрових локомотивів на основі накопичення рекуперативної енергії» (№ДР0116U005783), «Методологія управління технічною експлуатацією модернізованого рухомого складу залізниць України протягом його життєвого циклу» (№ ДР 0113U001029).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення експлуатаційних характеристик маневрового локомотива ЧМЕЗ за рахунок використання накопичувача енергії в силовому ланцюзі.

Досягнення поставленої мети передбачає виконання таких завдань:

- проаналізувати світовий досвід використання накопичувачів енергії на транспорті, визначити переваги і недоліки та розробити ефективні методи розрахунку параметрів накопичувача енергії маневрового тепловоза для покращення експлуатаційних характеристик на підставі отриманих даних;
- провести оцінку впливу типів маневрової роботи на кількість енергії електродинамічного гальмування та параметрів накопичувача енергії маневрового тепловоза;
- розробити структурну та імітаційну моделі для аналізу електродинамічних процесів у тяговому приводі тепловоза з накопичувачем енергії;
- розробити алгоритм управління тяговим електроприводом із накопичувачем, який забезпечуватиме ефективне використання енергії гальмування рухомого складу та зниження навантаження на систему електропостачання в режимі тяги;
- розробити рекомендації щодо програмного та апаратного забезпечення для реалізації системи автоматичного управління тяговим електроприводом із накопичувачем енергії в силовому ланцюзі.

**Об'єкт дослідження** – експлуатаційні характеристики, на які впливають процеси функціонування накопичувачів енергії маневрових тепловозів.

**Предмет дослідження** – методи і моделі визначення техніко-економічних показників накопичувачів енергії маневрових тепловозів.

**Методи дослідження.** Розв'язання поставлених задач виконано з використанням експериментальних і теоретичних методів дослідження. Узагальнено досвід вітчизняних і зарубіжних залізниць у сфері створення тягового рухомого складу з накопичувачами енергії. У роботі використано метод спостереження (хронометражу) для визначення часу роботи дизель-генераторної установки тепловозів на кожній позиції контролера машиніста та кількості переключень між позиціями. За метод дослідження використане імітаційне моделювання електромеханічних процесів у тяговому приводі локомотива. Для реалізації імітаційної моделі на ПК і під час оброблення отриманих результатів застосовано програмні пакети *Matlab* і *Sumulink*. Експериментальне дослідження проведене на дослідному маневровому локомотиві ЧМЕЗТ, обладнаному накопичувачем енергії.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

Уперше:

- науково обґрунтована можливість покращення експлуатаційних характеристик маневрових тепловозів завдяки використанню комбінованих секційних накопичувачів енергії в силовому ланцюзі завдяки накопиченню енергії електродинамічного гальмування при виконанні маневрових робіт;

- створено імітаційну модель роботи секційного комбінованого накопичувача енергії у складі гібридної силової установки тепловоза ЧМЕЗТ.

Дістали подальший розвиток:

- комплексна імітаційна модель розрахунку режимів роботи енергосилових установок тепловоза ЧМЕЗ з урахуванням умов маневрової роботи;

- модель визначення техніко-економічних показників комбінованого накопичувача енергії в маневрових локомотивах.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Розроблений комплекс моделей дозволяє отримати науково обґрунтований підхід до розробки накопичувача енергії для підвищення експлуатаційних характеристик маневрового тепловоза (патент на корисну модель №124916). Отримано залежності, що дозволяють підібрати параметри накопичувача енергії для використання в різних режимах маневрової роботи. Використання накопичувача дозволило зменшити значення пускових струмів порівняно зі штатним приводом і реалізувати повільний пуск. У роботі обґрунтовано необхідні для реальних умов експлуатації параметри гібридних силових установок маневрових локомотивів. Розроблено методику визначення тягово-енергетичних показників маневрової роботи, що дозволяє підвищити ефективність застосування накопичувачів енергії в умовах автономної тяги.

Основні практичні результати щодо модернізації маневрового тепловоза з комбінованим накопичувачем енергії використано і впроваджено на дослідному тепловозі ЧМЕЗТ. Упровадження положень дисертаційної роботи дозволило покращити експлуатаційні характеристики роботи маневрового тепловоза, а також отримати стабільну економію дизельного палива.

Матеріали дисертації впроваджено в навчальний процес Українського державного університету залізничного транспорту під час вивчення дисциплін «Основи експлуатації локомотивів», «Локомотивні енергетичні установки» та під час проведення учбово-дослідних робіт студентів і магістрів. Практичне впровадження результатів роботи підтверджено відповідними документами, наведеними в додатках до роботи.

**Особистий внесок здобувача.** Основні положення та результати дисертаційних досліджень отримано автором самостійно.

У працях, написаних та опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: [5] – розрахунок енергоефективності застосування комбінованих накопичувачів електричної енергії під час маневрових роботах на локомотиві ЧМЕЗ; [6] – розроблення методики імітаційного моделювання маневрових режимів роботи тепловоза ЧМЕЗ; [7] – розроблення методики імітаційного моделювання процесів електродинамічного гальмування маневрового тепловоза.

**Апробація роботи.** Основні положення дисертаційної роботи та її результати доповідалися й обговорювалися на Міжнародній науково-практичній конференції «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» (2015 р., м. Лозова); Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів і

молодих учених «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» (2015 р., м. Харків); Міжнародній науково-практичній конференції «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» (2016., м. Трускавець); Globalization of scientific and education alspace. Inovation sofransport. Problems, experience, prospects, (May 2017, Dresden (Germany) – Paris (France)); The sesof international scientific and practical conference «Globalization of scientific and educational space. Inovation sofransport. Problems, experience, prospects» (May 2019 Salou (Spain)); IX-й Міжнародній науково-практичній конференції «Транспорт і логістика: проблеми та рішення» (2019 р. м. Одеса).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 19 друкованих робіт, у тому числі 8 наукових статей (3 з них у співавторстві) у фахових наукових виданнях, затверджених МОН України, 1 стаття у журналі, що включений до міжнародної наукометричної бази, а також 10 тез доповідей, що відображають основний зміст дисертаційної роботи, та 1 авторське свідоцтво.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (141 позицій). Роботу викладено на 183 сторінках, у тому числі 142 сторінок основного тексту, 62 рисунків, 16 таблиць і 14 сторінок додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

**У вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету, завдання, об'єкт та предмет вивчення, відображено наукову новизну, практичне значення й методи дослідження. Надано інформацію про апробацію, публікації та впровадження результатів дослідження.

**У першому розділі** розглянуто основні напрями розвитку систем накопичення енергії й окреслено перспективи їх застосування для тяги поїздів. Виконано аналіз наявних технічних рішень в області накопичувачів енергії і розглянуто можливі рішення проблеми їх застосування на тяговому рухомому складі. Визначено основні параметри використовуваних і проєктованих накопичувачів різних типів, найважливішим із яких є енергоємність. Представлено матеріали з характеристиками енергетичних установок, інформаційне та методичне забезпечення оцінки експлуатаційної ефективності наявних гібридних приводів рухомого складу. В останні роки в науково-дослідних організаціях, навчальних закладах і на залізницях виконано низку досліджень, спрямованих на підвищення надійності та паливної економічності локомотивів, за рахунок використання накопичувачів енергії. Дослідження із застосування й удосконалення гібридних систем на тяговому складі проводяться в Україні та країнах СНД під керівництвом таких відомих учених: Г. Г. Басов, Б. Є. Боднар, Н. Є. Боровий, А. І. Володін, М. І. Горбунов, О. М. Гончаров, В. Л. Горобець, С. Г. Грищенко, М. Л. Забелло, Н. Н. Заліт, В. М. Іванов, А. П. Фалендиш, Ю. В. Черняк, В. П. Казанцев, Ю. Є. Калабухін, В. Г. Маслієв, Г. С. Міхальченко, В. І. Мороз, Л. В. Одінцов, Г. В. Попов, Е. Д. Тартаковський і багатьох інших. Подібні дослідження виконані

закордонними вченими: К. Р. Аклі, С. Бінгхам, П. Вольф, Дж. Джент, А. Джейніс, Ф. В. Донеллі, В. Іверс, Р. Л. Коусінью та іншими.

Проведений аналіз стану парку та його старіння показав, що при подовженні терміну експлуатації маневрових тепловозів виникає проблема кардинальної модернізації не тільки силових вузлів та агрегатів, але й систем управління та діагностики. Запропоновано декілька варіантів принципів силових схем комбінованих силових установок для тепловозів типу ЧМЕЗ, у запропонованих конструктивних рішеннях силових установок забезпечено злагоджену роботу тягового двигуна та накопичувача енергії в усіх режимах роботи локомотива: енергія накопичується протягом рекуперативного гальмування, на тягу використовується енергія як із генератора, так і з накопичувача.

Характерні показники накопичувачів енергії, що застосовуються на тяговому рухомому складі, зведено в таблицю 1.

Таблиця 1

## Показники накопичувачів енергії

Тип накопичувача		Питома енергія, кДж/кг	Час розряду, с
Хімічний	АБ	$10^2 - 10^3$	$1 - 10^5$
	ТЕ	$(1,5 - 2) 10^3$	
Індуктивний	ІН	5 - 10	$10^{-2} - 10$
	НППН	20 - 50	
Ємнісний	Конденсатор	0,1 - 0,37	$10^{-6} - 10^2$
	Іоністор	50 - 60	
Механічний	Маховик	$2 \cdot 10^2 - 1,5 \cdot 10^4$	$1 - 10^3$
	Пружинний	0,1-0,2	
	Гідрогазовий	$(1 - 6) 10^2$	$1 - 10^3$

Проаналізувавши енергетичні, конструктивні та масо-габаритні показники накопичувачів енергії, що застосовуються на тяговому рухомому складі, можна зробити висновок про те, що найбільш доцільними накопичувачами енергії на теперішній час є комбіновані секційні накопичувачі хімічного та ємнісного типу (зокрема комбінація тягових акумуляторів і конденсаторів великої ємності).

Також у першому розділі проведено аналіз експлуатаційних характеристик на які впливають процеси функціонування накопичувачів енергії маневрових тепловозів: експлуатаційні витрати палива, питома гальмівна сила локомотива при електродинамічному гальмуванні, перехідні процеси у силовому ланцюгу (зокрема регулювання пускових струмів), моторесурс дизельної установки.

У другому розділі розроблено автором загальну математичну модель роботи маневрового локомотива з накопичувачем енергії.

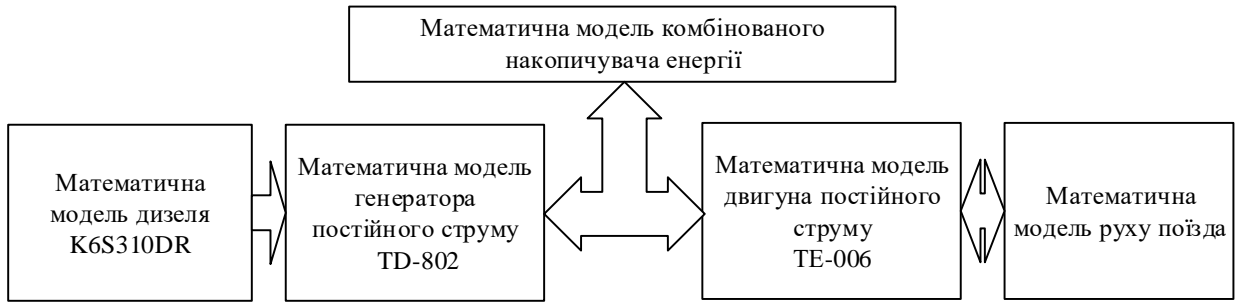


Рисунок 1 – Узагальнена математична модель роботи маневрового тепловоза з накопичувачем енергії

Для побудови структурної схеми двигуна постійного струму послідовного збудження використано систему рівнянь, яка описує його поведінку:

$$\begin{cases} U_{я} = L_{\Sigma} \frac{dI_{я}}{dt} + r_{\Sigma} \cdot I_{я} + E \\ M_{\partial в} - M_{с} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \\ E = C_E \Phi \omega \\ M_{\partial в} = C_M \Phi I_{я} \end{cases} \quad (1)$$

Структурну схему електропривода постійного струму зображено на рисунку 2

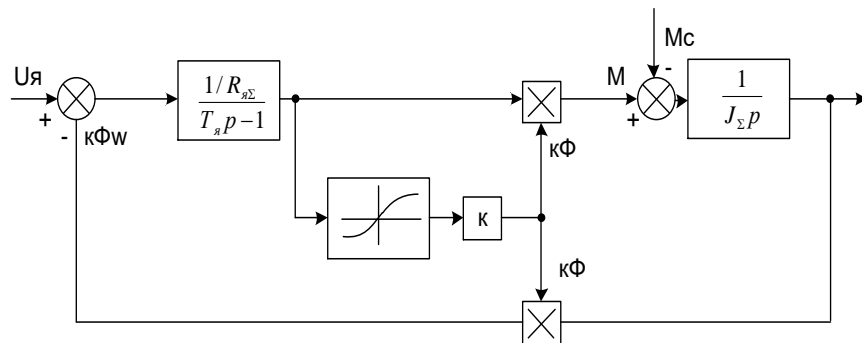


Рисунок 2 – Структурна схема електропривода постійного струму з двигуном послідовного збудження

Для побудови структурної схеми генератора постійного струму незалежного збудження використано систему рівнянь, яка описує його поведінку:

$$\begin{cases} U_{аg} = E_g - L_{sg} \cdot \frac{dI_{аg}}{dt} + R_{sg} \cdot I_{аg} \\ U_{vg} = L_{vg} \cdot \frac{dI_{vg}}{dt} + R_{vg} \cdot I_{vg} \\ E_g = k_g \cdot \Phi_g \cdot \omega_{dis} \\ M_n = k_g \cdot \Phi_g \cdot I_{аg} \end{cases} \quad (2)$$

Для побудови математичної моделі генератора розраховуємо всі його невідомі параметри, що входять до структурної схеми:



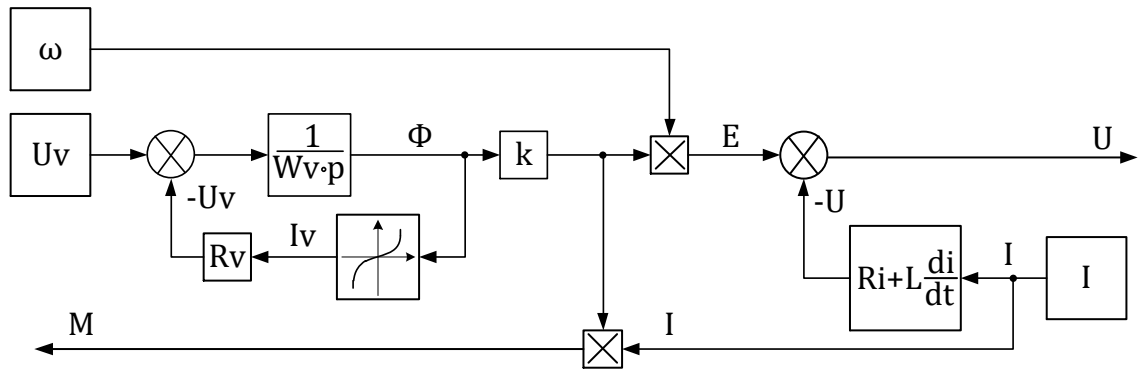


Рисунок 3 – Структурна схема генератора постійного струму з незалежним збудженням

Для побудови структурної схеми дизеля використовуємо систему рівнянь, яка описує його поведінку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{J_{ДГ} \cdot \omega_n}{n_n} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{M_{\partial n} \cdot (h - h_{xx})}{\partial h} - M_n \\ T_a \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{n_n}{h_n} \cdot (h - h_{xx} - h_{нагр}) \\ T_a = \frac{J_{ДГ} \cdot \omega_n}{M_{\partial n}} \\ h_{нагр} = \frac{M_{нагр}}{M_{\partial n}} \cdot h_n \end{array} \right. , \quad (3)$$

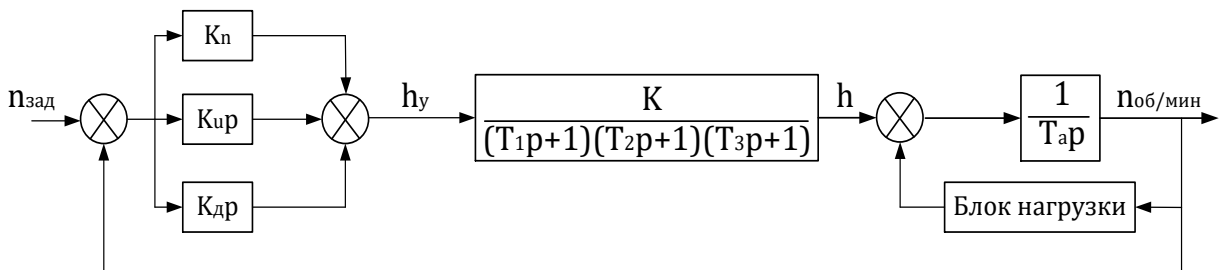


Рисунок 4 – Структурна схема дизеля

Структуру блоків, що моделює питомий опір рухомого складу, можна представити як сукупність таких блоків: блок, що моделює роботу тепловоза; блок, що обчислює швидкість поїзда; блок, що обчислює питомий опір руху локомотива; блок, що обчислює питомий опір руху складу; блок, що обчислює питомий опір руху поїзда в цілому; блок, що обчислює момент опору. Усі блоки об'єднано в один блок «*subsystem*», що називається «*Poezd*».

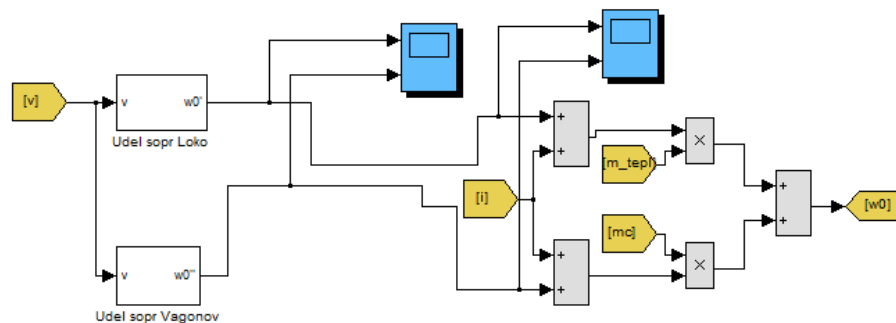


Рисунок 5 – Структура блока, що моделює питомий опір руху потяга

Зміни струму при накопиченні та звільненні енергії в комбінованому накопичувачі енергії запропоновано описати диференціальним рівнянням

$$\begin{cases} \frac{di_T}{dt} = \frac{U_T - E_{ED} - I_T R_T - I_T R_{ED} - I_{II} R_{ED}}{L_{ED} \left(1 + \frac{R_T}{R_{II}}\right)} \\ \frac{di_{II}}{dt} = \frac{U_{II} - E_{ED} - I_{II} R_{II} - I_T R_{ED} - I_{II} R_{ED}}{L_{ED} \left(1 + \frac{R_{II}}{R_T}\right)} \end{cases} \quad (4)$$

Структурну схему підключення накопичувача енергії наведено на рис. 6.

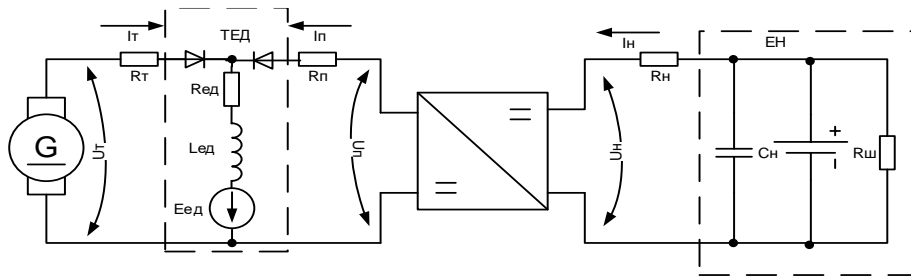


Рисунок 6 – Структурна схема підключення накопичувача енергії

Загальний вигляд математичної моделі руху поїзда з тепловозом ЧМЕЗ зображено на рисунку 7.

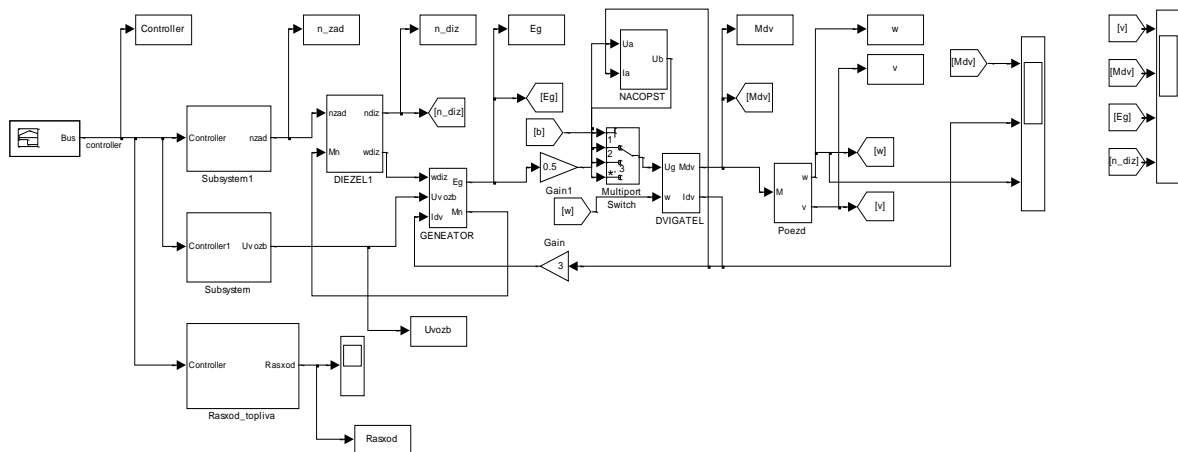


Рисунок 7 – Загальний вигляд математичної моделі руху маневрового тепловоза ЧМЕЗ

**Третій розділ** присвячено аналізу енергетичних показників електричного гальмування маневрових локомотивів, розробленню алгоритмів управління накопичувачем і розробленню рекомендацій щодо програмного та апаратного забезпечення для реалізації системи автоматичного управління тяговим електроприводом із накопичувачем енергії в силовому ланцюзі системи комбінованого накопичувача енергії.

Найбільш достовірну інформацію, що дозволяє оцінити ефективність використання систем акумуляування та рекуперації енергії в умовах експлуатації залізниць, можна отримати на основі спеціально поставлених тягово-енергетичних експериментів. Такі експерименти дозволяють встановити

відповідність реалізованої потужності та характеристик обладнання розрахунковим, а також необхідним у конкретних експлуатаційних умовах.

На етапі проектування вибір основних параметрів накопичувачів енергії автономних локомотивів і оцінку ефективності їх застосування можна виконати, використовуючи експериментальні дослідження фактичних режимів роботи силових установок тепловозів, а також систем електричного гальмування.

Важливу роль у таких дослідженнях відіграють тягово-експлуатаційні випробування. З цією метою було проведено кілька серій експериментальних поїздок із виконанням різних типів маневрової роботи. Такий підхід до постановки експерименту дозволив урахувати різноманіття експлуатаційних факторів, які найбільш часто зустрічаються в реальних умовах роботи маневрових локомотивів.

Матеріали цих випробувань дозволили дати попередню оцінку параметрів силових установок локомотивів із комбінованими накопичувачами енергії, які відповідають різним експлуатаційним умовам.

У процесі експериментальних поїздок безперервно реєструвалися режими ведення поїзда, в т.ч. гальмівний режим як при спільному застосуванні реостатного та пневматичного гальм, так і при використанні одного реостатного гальма. Фіксувалися такі параметри: швидкість, сила тяги та електричне гальмування на автозчепленні, напруга та струм у силовому ланцюзі, пройдений шлях і час.

Таблиця 2

Числові характеристики факторів режиму електродинамічного гальмування у ході маневрової роботи

Фактори	Мах	Мін	Середнє
Маса потягу, т	4200	123	2161
Середній ухил, ‰	-2	1	-0,5
Швидкість початку гальмування, км/г	35	10	22,5
Середня швидкість гальмівного режиму, км/г	31	8	19,5
Шлях у режимі гальмування, м	110	25	67,5
Механічна робота електричного гальмування, кВт/г	324	0,73	162,4

Дані експериментальних поїздок оброблені статистичними методами, в результаті чого отримані:

- числові характеристики основних факторів, що впливають на величину механічної роботи електродинамічного гальмування поїзда;
- закони розподілу механічної роботи електродинамічного гальмування;
- кількісні оцінки необхідної енергоємності накопичувача енергії для роботи в режимі рекуперації.

Числові характеристики: мінімальні, максимальні, середні значення та стандартні відхилення механічної роботи електричного гальмування та факторів, що впливають на величину цієї роботи – наведені для першої серії випробувань в табл. 2.

Ці дані, які отримано в результаті проведення багатофакторного експерименту, використано для побудови моделей режимів електричного гальмування поїзда та оцінки необхідної енергоємності накопичувача в реальних умовах застосування рекуперації енергії.

За величинам швидкостей початку та закінчення електродинамічного гальмування для середнього значення маси потягу, з урахуванням впливу ухилів було проведено оцінку кінетичної енергії, що виділяється під час гальмування. Розподіл її показано на рис. 8.

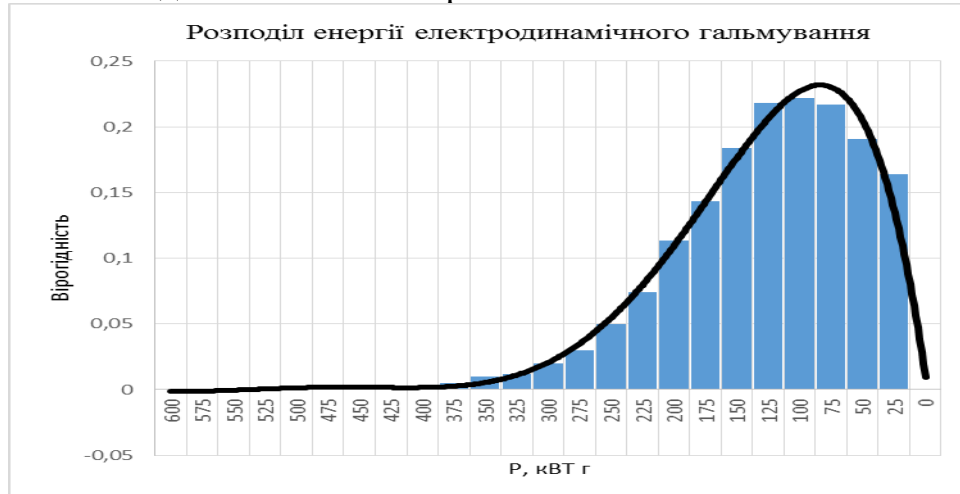


Рисунок 8 – Гістограма розподілу енергії електродинамічного гальмування

Для умов виконання маневрової роботи на станції Лиман, розподіл механічної роботи електричного гальмування можна апроксимувати за законом Пуассона:

$$P_A = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}. \quad (5)$$

Адекватність отриманих законів розподілу енергії електродинамічного гальмування визначалася ступенем наближення передбачуваних теоретичних законів до емпіричних щільностей імовірностей розподілу величини  $P_A$ . Використано критерій згоди Пірсона:

$$\chi^2 = n \sum_{k=1}^N \frac{(p_k - p_k)^2}{p_k}. \quad (6)$$

Ступінь відповідності передбачуваного теоретичного розподілу емпіричному, оцінюється значенням імовірності  $P(\chi^2, r)$ , яке для маневрової роботи складає  $0,53 > 0,05$ . Тому можна вважати отримані закони розподілу механічної роботи електричного гальмування поїзда адекватними.

Запропоновано підхід до вибору необхідної енергоємності накопичувача енергії, який забезпечує найбільш повне використання енергетичного потенціалу силової установки тепловоза.

Результат розрахунку показано на рис. 9. Починаючи з енергоємності 50-100 мДж, подальше збільшення ємності НЕ не призводить до істотного

зростання частки енергії, яка запасається в ньому при виконанні маневрових робіт. З одного боку, це означає зниження частки енергії, яка запасається та може бути використана повторно. Але, з іншого боку, створюється можливість для значного зниження енергоємності, а це означає, що вартості НЕ скоротять термін його окупності. Таким чином, енергоємність накопичувача, розрахованого на прийом енергії гальмування, може бути прийнята рівною 50 мДж.

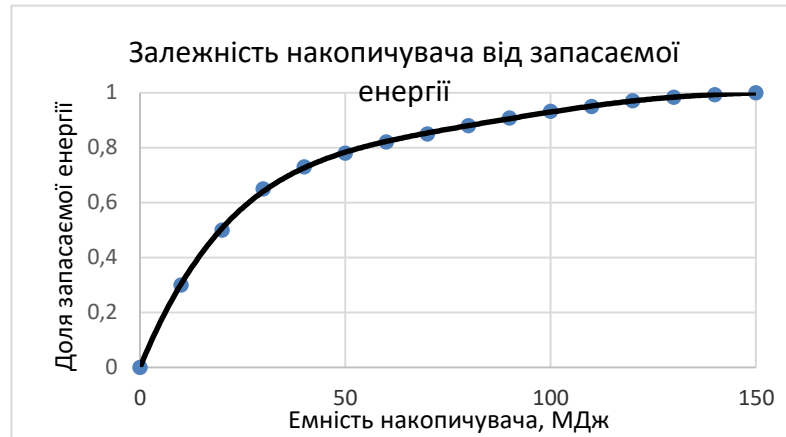


Рисунок 9 – Залежність запасаної енергії від ємності НЕ

**Четвертий розділ** присвячено аналізу функціональних схем підключення комбінованого накопичувача енергії до силового ланцюга маневрового тепловоза. Тут обрано схему, яка передбачає використання перетворювача енергії *DC-DC* та систем контролю, стабілізації заряду та розряду як акумуляторної, так і конденсаторної секції.

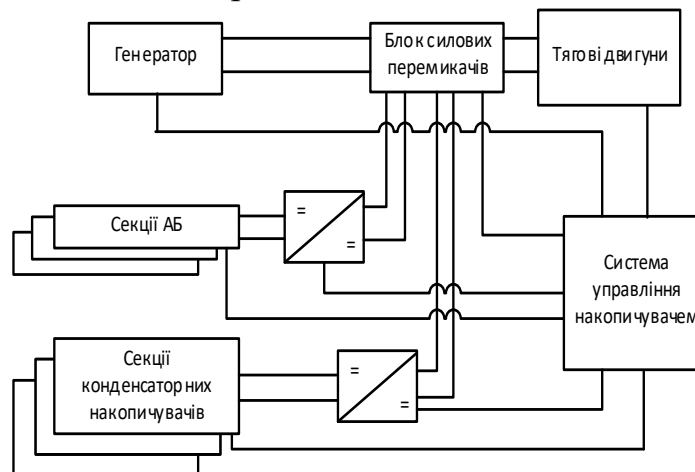


Рисунок 10 – Схема підключення комбінованого секційного накопичувача

Розроблено схему підключення комбінованого накопичувача енергії до силового ланцюга локомотива. Безпосереднє підключення силових конденсаторів до акумуляторної батареї з малою ємністю призведе до виникнення пускових струмів, що рівнозначне короткому замиканню. Крім того, застосування суперконденсаторів спільно з акумуляторними батареями

може призвести до гігантських імпульсних викидів потужності під час випадкових коротких замикань (рис. 10).

Результати випробувань комбінованої системи пуску показали, що при використанні великих значень ємності (більше 100 Ф) суперконденсатора виникає необхідність застосування системи контролю напруги заряду, тому що перезарядження суперконденсаторів призводить до підвищення їхньої температури, а це може призвести до вибуху та виходу з ладу.

У зв'язку з цим розроблено схему підключення комбінованої секційного накопичувача електроенергії до силового ланцюга маневрового локомотива з електропередачею (рис. 10).

На рис. 11 представлено електричну схему підключення секцій конденсаторного накопичувача з поділом зарядних і розрядних струмів, яка містить зарядний і розрядний ланцюг паралельно з'єднаних секцій суперконденсаторів.

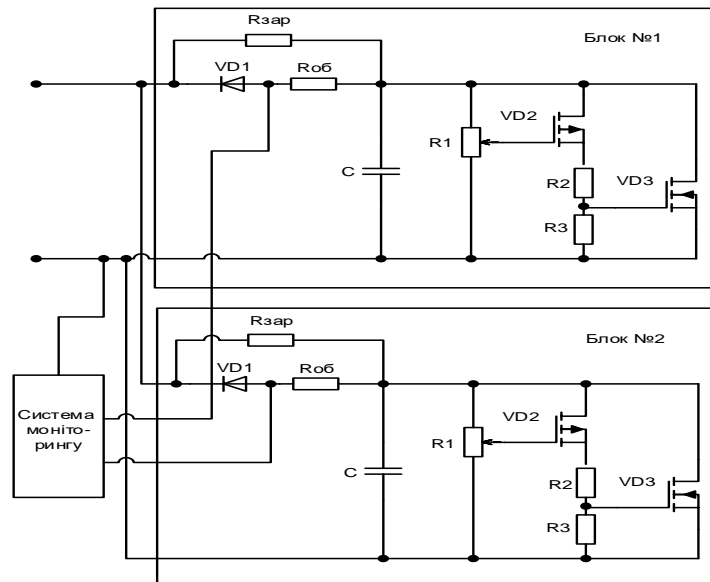


Рисунок 11 – Схема підключення секцій конденсаторного накопичувача

Для підвищення ємності силових конденсаторів використовують конденсаторні збірки.

На рис. 12 представлено електричну схему підключення секцій акумуляторних батарей з аналоговим балансиrom. В аналогових балансирах функцію контролю за напругою зазвичай виконує компаратор, забезпечений опорною напругою. Найпоширеніша мікросхема TL431, в якій є компаратор з опорною напругою.

Для різних електроустановок потрібне забезпечення оптимальних режимів заряду та розряду суперконденсаторів. З метою підвищення надійності та безпеки доцільно використовувати високоточні стабілізатори на базі польових транзисторів.

Система моніторингу здійснює поточний контроль напруги, діагностику та статистичний контроль нештатних експлуатаційних режимів накопичувача.

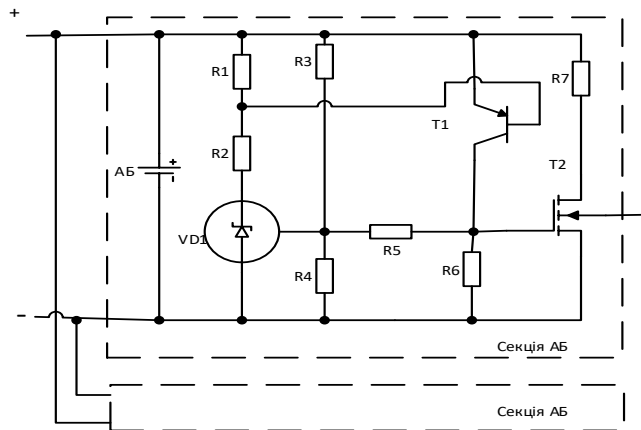


Рисунок 12 – Схема підключення секцій АБ

Для забезпечення покращення результатів при використанні накопичувача енергії та збереження максимальної кількості енергії під час гальмування необхідно обрати раціональні параметри акумуляторної батареї та блоку суперконденсаторів.

Коефіцієнт використання силових конденсаторів розраховуємо за формулою:

$$K_u = \frac{E_{C_{\max}} - E_{C_{\min}}}{E_{C_{\max}}} = 1 - \left( \frac{U_{C_{\min}}}{U_{C_{\max}}} \right)^2. \quad (7)$$

На рис. 12. побудовано графік залежності коефіцієнта використання енергії конденсатора від співвідношення мінімального та максимального значення напруги заряду  $C$ . Як видно з представленої залежності, доцільно розряджати  $C$  до мінімальної напруги  $\leq 20\%$  від максимальної. При цьому коефіцієнт використання енергії конденсаторної батареї буде максимальним.

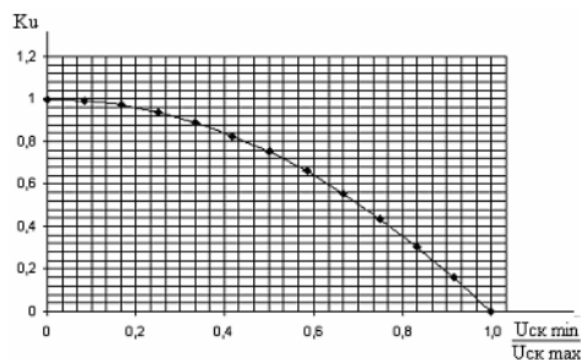


Рисунок 13 – Залежність коефіцієнта використання енергії конденсатора від співвідношення мінімального і максимального значення напруги заряду

Значення ємності конденсаторного блоку з урахуванням коефіцієнта використання

$$C = \frac{2,1A_C}{U_{C_{\max}}^2} = \frac{2,1A_{\text{зал}}}{U_{C_{\max}}^2} \eta \quad (8)$$

Отже, ємність конденсаторного накопичувача при електродинамічному гальмуванні тільки локомотива повинна бути не менше 100 Ф, тому необхідно використовувати комбіновані накопичувачі.

Так як основний режим накопичення енергії – це режим електродинамічного гальмування, розроблений алгоритм керування роботою НЕ, який враховує гальмівне зусилля та гальмівний шлях.

У п'ятому розділі проведено оцінювання енергетичної, екологічної та техніко-економічної ефективності застосування комбінованого накопичувача енергії в силовому ланцюзі маневрового локомотива.

Для визначення енергетичної ефективності комбінованих накопичувачів енергії під час експлуатації тепловозів на різних типах маневрової роботи було розроблено імітаційні моделі, що дозволяють за заданим режимом роботи тепловоза визначити необхідну потужність теплового двигуна тепловоза й оцінити величину економії палива, що отримується в результаті застосування накопичувача.



Рисунок 15 – Частка часу роботи маневрового тепловоза залежно від типу маневрових робіт

Маневрова робота характеризується великими простоями тепловоза в очікуванні, зміною позицій контролера машиніста, роботою на низьких позиціях контролера, частими прискореннями та гальмуванням. У цілому ці процеси носять стохастичний характер. У ході виконання маневрових переміщень тепловози працюють на перехідних режимах. Під час аналізу маневрової роботи в межах станції Лиман можна виділити декілька робіт, які мають схожі характеристики: роботу на гірці, вивізну роботу, маневрову роботу та ділянкову роботу. На більшості маневрових локомотивах встановлено систему контролю витрат палива «БІС-Р». Система «БІС-Р» являє собою розподілену мікропроцесорну систему для контролю витрат палива маневровими тепловозами, ця система фіксує витрати палива, потужність, час роботи на кожній позиції контролера машиніста протягом 10 діб із дискретністю 2 хв.



Проаналізувавши дані системи «БІС-Р», можна визначити середній час роботи маневрового тепловоза на  $i$ -й позиції контролера в залежності від типу маневрових робіт.

На рис. 14 спостерігаємо нерівномірний розподіл часу роботи маневрового тепловоза на окремій позиції контролера машиніста залежно від типу маневрової роботи.

Моделювалися режими роботи тепловоза, отримані в результаті аналітичних розрахунків за розробленою методикою, а також реальні режими роботи силових установок тепловоза, отримані за даними випробувань. Визначалися фактична і необхідна (за наявності накопичувача) потужність дизеля, необхідна енергоємність накопичувача та оцінювалася величина економії палива, що отримується за рахунок застосування рекуперативних силових установок.

Модель дозволяє імітувати роботу накопичувача енергії при різних варіантах схем комбінованих силових установок.

Величина витрат палива  $Ge$  може бути визначена як

$$Ge = \sum_{j=1}^n g_{kj} \Delta t + \sum_{i=1}^m g_{xi} \Delta t, \quad (9)$$

У режимі тяги величина витрат палива  $g_{kj}$  приймається відповідно до позиції  $n_{kj}$ , що використовується на  $j$ -му кроці.

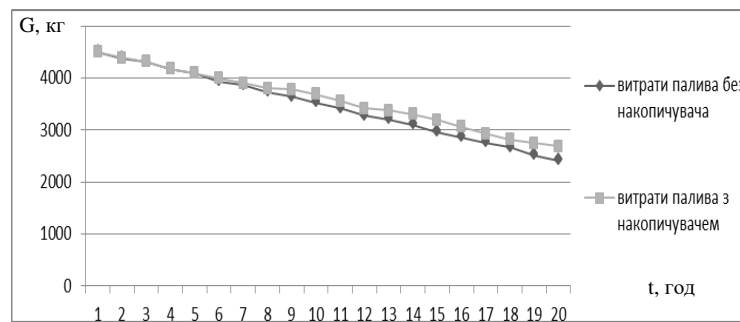


Рисунок 16 – Витрати палива маневровим локомотивом

Зменшення викидів забруднювальних речовин відбувається за рахунок накопичення енергії електродинамічного гальмування та заряду накопичувача на холостому ході для подальшого використання її на тягу.

На рис. 17 наведена діаграма залежності зменшення кількості середньоексплуатаційних питомих викидів забруднювальних речовин маневровим локомотивом із накопичувачем енергії від виду виконуваної маневрової роботи.

Як видно з аналізу даних, відсоток зменшення середньоексплуатаційних питомих викидів забруднювальних речовин до атмосфери маневровим локомотивом із накопичувачем енергії в силовому ланцюзі на різних видах маневрових робіт – неоднаковий. Це пов'язано з різною кількістю накопиченої енергії, яка залежить від характеру виконуваної маневрової роботи. Так, маневрова робота на гірці має максимальні показники зменшення середньоексплуатаційних питомих викидів, тому що при такій роботі має місце велика кількість циклічних прискорень та гальмувань.

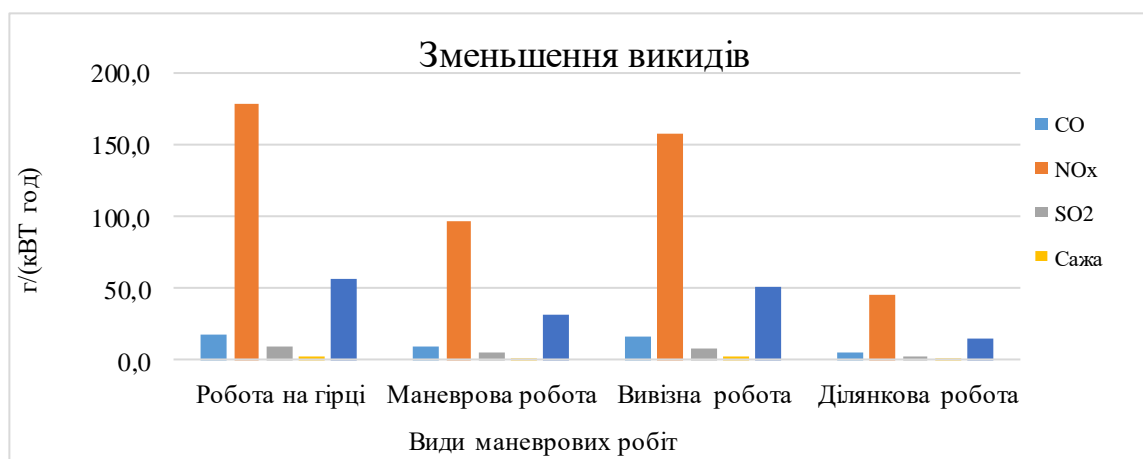


Рисунок 17 – Залежності зменшення кількості середньоексплуатаційних питомих викидів забруднювальних речовин маневровим локомотивом із накопичувачем енергії від виду виконуваної маневрової роботи

У роботі виконано оцінювання економічної ефективності модернізації маневрового локомотива ЧМЕЗ. На підставі проведених розрахунків визначено, що загальний економічний ефект від установаження комбінованих накопичувачів енергії настає після третього-четвертого року експлуатації залежно від типу маневрової роботи. Також визначено, що застосування комбінованого накопичувача дає змогу отримати щорічну економію дизельного палива в розмірі 15-25% на один локомотив.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання удосконалення характеристик маневрових тепловозів завдяки використанню накопичувача енергії в силовому ланцюзі.

Отримано наступні основні наукові результати:

1. Проаналізовано світовий досвід використання накопичувачів енергії у приводі локомотивів, визначено переваги та недоліки різних типів накопичувачів енергії, на підставі яких обрано секційний комбінований накопичувач енергії.

2. За допомогою інформації із систем БІС-Р, якими обладнані маневрові тепловози, отримано розподіли сумарної кількості включень контролера машиніста, витрат потужності та сумарний час роботи на кожній позиції за зміну роботи. На підставі цих досліджень за характером зміни режимів роботи маневрових тепловозів встановлено 4 основні види цих робіт: маневрова, вивізна, дільнична та робота на гірці. Проведено оцінку впливу типів маневрової роботи на кількість енергії електродинамічного гальмування та необхідні параметри комбінованого накопичувача енергії маневрового тепловоза.

3. Розроблено структурну та імітаційну моделі роботи гібридного маневрового тепловоза, яка складається з п'яти частин: модель тягового генератора, модель дизеля, модель тягового двигуна, модель опору руху та модель накопичувача. Отримано загальну імітаційну модель маневрового

локомотива, яка дозволяє проаналізувати основні показники роботи тепловоза для різних умов експлуатації.

4. Розроблено алгоритм управління тяговим електроприводом із накопичувачем залежно від умов маневрової роботи, який забезпечуватиме ефективне використання енергії гальмування рухомого складу та зниження навантаження на систему електропостачання в режимі тяги.

5. Розроблено рекомендації щодо програмного та апаратного забезпечення для реалізації системи автоматичного управління тяговим електроприводом із секційним накопичувачем енергії у силовому ланцюзі. Недоліком комбінованого накопичувача є те, що застосування суперконденсаторів спільно з акумуляторними батареями може призвести до гігантських імпульсних викидів потужності при випадкових коротких замиканнях. Запропоновано підключення силових конденсаторів до хімічного джерела з малою ємністю через перетворювач на *IGBT*-транзисторах.

6. Визначено, що прогнозований термін окупності при встановленні комбінованих накопичувачів енергії – на третій-четвертий рік експлуатації залежно від типу маневрової роботи. Застосування комбінованого накопичувача дає змогу отримати щорічну економію дизельного палива в розмірі від 15 до 25% залежно від типу маневрової роботи.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

**Наукові праці, у яких опубліковано основні наукові результати дисертації:**

1. Яровий Р.О. Використання силових конденсаторів в системах електродинамічного гальмування локомотивів, *Вісник Східноукраїнського національного університету*, 2013, № 5 (205), С.173-177.

2. Яровий Р.О. Моделювання тягового електроприводу маневрового локомотива з накопичувачем енергії у силовому ланцюгу, *Вісник Східноукраїнського національного університету*, 2015, № 1 (218), С.284-287.

3. Яровий Р.О. Комбіновані накопичувачі енергії у силовому ланцюгу маневрових локомотивів, *Вісник Східноукраїнського національного університету*, 2016, № 1 (225), С.240-248.

4. Яровий Р.О. Ефективності застосування комбінованих накопичувачів електричної енергії на маневрових тепловозах, *Вісник Східноукраїнського національного університету*, 2017, № 3 (233), С.237-240.

5. Яровий Р.О. Чернецька-Білецька Н. Б. Енергоефективність застосування накопичувачів електричної енергії при маневрових роботах, *Вісник Східноукраїнського національного університету*, 2018, № 1 (242), С.170-174.

6. Яровий Р.О. Чернецька-Білецька Н. Б. Методика імітаційного моделювання режимів роботи маневрового тепловозу, *Вісник Східноукраїнського національного університету*, 2019, № 2 (250), С.131-134.

7. Яровий Р.О. Чернецька-Білецька Н. Б. Методика імітаційного моделювання процесів електродинамічного гальмування. *Вісник Східноукраїнського національного університету*, 2019, № 3 (251), С.183-187.

8. R. Yarovoy, N. Chernetskaya-Beletskaya, E. Mikhailov Influence of use of energy storage on emissions of pollutant substances by a maneuver lokomotive, *Eastem-*

*European Journal of Enterprise Technologies, 2019, Vol 4, No 10(100), Інтернет-посилання: <http://journals.uran.ua/ejet/article/view/176908>*

**Додатково матеріали дисертаційної роботи викладено в працях:**

9. Яровий Р.О. Математическое моделирование переходных процессов в тяговых электродвигателях при электродинамическом торможении, *Зб. наук. пр. Східноукраїн. нац.ун-т. ім. В.Даля. Інноваційні технології на залізничному транспорті, Луганськ, Вид-цтво СНУ ім. В.Даля, 2013, С.232-234.*

10. Яровий Р.О. Математична модель тягового електроприводу маневрового локомотива з урахуванням накопичувачем енергії у силовому контурі, *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції. Інформаційні та моделюючі технології, Черкаси, 2014, С.127-129.*

11. Яровий Р.О. Аналіз використання накопичувачів енергії у силовому приводі маневрових локомотивів. *Зб. наук. пр. Східноукраїн. нац. ун-т. ім. В.Даля. Інноваційні технології на залізничному транспорті, Лозова, Вид-цтво СНУ ім. В.Даля, 2015, С.182-184.*

12. Яровий Р.О. Комбіновані накопичувачі енергії у силовому ланцюзі маневрових локомотивів. *Зб. наук. пр. Східноукраїн. нац. ун-т. ім. В.Даля. Інноваційні технології на залізничному транспорті, Трускавець, Вид-цтво СНУ ім. В.Даля, 2016. С.205-207.*

13. Яровий Р.О. Визначення параметрів електродинамічного гальмування маневрового локомотива чмеЗт, *Актуальні проблеми сучасного управління в соціально-економічних, технічних та гуманітарних системах: збірник тез конференції, 2016, м.Одеса, С. 127-130.*

14. Яровий Р.О. Чернецька-Білецька Н. Б. Знаходження параметрів комбінованого накопичувача енергії для маневрового локомотива, *Зб. наук. пр. Східноукраїн. нац. ун-т. ім. В.Даля. Інноваційні технології на залізничному транспорті, Лиман, Вид-цтво СНУ ім. В.Даля, 2017. С. 180-182.*

15. Yarovoy R. The effectiveness of combined storage of electrical energy on shunting locomotives, *Globalization of scientific and educational space. Innovation softtransport. Problems, experience, prospects, May 2017, Dresden (Germany) - Paris (France).*

16. Яровий Р.О. Чернецька-Білецька Н. Б. Вибір схеми комбінованого накопичувача енергії у силовому приводі маневрових локомотивів. *Зб. наук. пр. Східноукраїн. нац.ун-т. ім. В.Даля. Інноваційні технології на залізничному транспорті. – Северодонецьк: Вид-цтво СНУ ім. В.Даля, 2018. -С.*

17. Yarovoy R., Chernetskaya-Beleckaya N. Method of imitation modeling of manifolded thermal work modes, *The sesof international scientific and practical conference "Globalization of scientific and educational space. Innovation softtransport. Problems, experience, prospects", May 2019 Salou (Spain).*

18. Яровий Р.О. Методика імітаційного моделювання процесів електродинамічного, *IX-ої Міжнародної науково-практичної конференції Транспорт і логістика: проблеми та рішення, 2019р. м. Одеса.*

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

19. Патент на корисну модель №124916, кл. В60L 13/00 Пристрій накопичення рекуперативної електричної енергії електротехнічного комплексу локомотива/ Яровий Р.О., Чернецька-Білецька Н. Б.; заявник і власник СНУ ім. В.Даля. – ua№83779; заявл. 25.04.2018; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8. – 24 с.

## АНОТАЦІЯ

**Яровий Р. О. Підвищення експлуатаційних характеристик маневрових тепловозів шляхом використання комбінованих накопичувачів енергії.** Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.22.07 – рухомий склад залізниць і тяга поїздів (273 – залізничний транспорт). – Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, Северодонецьк, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання – підвищення експлуатаційних характеристик модернізованих маневрових локомотивів завдяки використанню комбінованих накопичувачів енергії. Також розроблено імітаційну модель роботи маневрового тепловоза з комбінованим накопичувачем енергії у силовому ланцюзі, визначено оптимальні параметри комбінованого накопичувача енергії з урахуванням умов експлуатації та перехідних режимів у силовому ланцюзі. На основі моделей розроблено програмний комплекс для розрахунку техніко-економічних характеристик маневрового тепловоза ЧМЕЗ з комбінованим накопичувачем енергії.

**Ключові слова:** маневровий тепловоз, режими роботи, експлуатаційні характеристики, гібридна силова установка, комбінований накопичувач енергії, імітаційне моделювання.

## АННОТАЦИЯ

**Яровой Р.А. Повышение эксплуатационных характеристик маневровых тепловозов путем использования комбинированных накопителей энергии.** Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.07 – подвижной состав железных дорог и тяга поездов (273 – железнодорожный транспорт). – Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля, Северодонецк, 2019.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи – повешения эксплуатационных характеристик маневровых тепловозов за счет использования секционных комбинированных накопителей энергии в силовой цепи маневровых локомотивов с электропередачей.

Анализ состояния современного парка маневровых тепловозов показывает, что он по многим параметрам не отвечает нуждам общества и европейским стандартам качества транспортных услуг. Поэтому возникает необходимость в модернизации существующего подвижного состава. В настоящее время большое внимание уделяется энерго- и ресурсосберегающим технологиям на железнодорожном транспорте. При этом одно из важных качеств тепловозов с электропередачей – это возможность применения электродинамического торможения, которое обладает рядом преимуществ по сравнению с пневматическим. Анализ существующих маневровых локомотивов с электродинамическим торможением показал, что оно экономически неэффективно, так как энергия торможения поглощается тормозными резисторами, которые превращают ее в тепло и рассеивают в окружающую среду. Также в маневровых тепловозах с электродинамическим торможением отсутствует система управления тормозным усилием. Одним из способов повышения экономичности эксплуатации маневровых тепловозов является установка накопителей энергии для отбора и хранения энергии электродинамического

торможения. В качестве возможных накопителей энергии могут быть использованы аккумуляторные батареи, конденсаторы высокой емкости, индукционные накопители, гироскопические аппараты и т.п. Кроме экономического аспекта сокращения расхода топлива, данная модернизация тепловоза позволит улучшить экологические показатели.

Из анализа методов и моделей следует, что разные ученые из разных стран в течение многих лет проводили исследования, направленные на определение технико-экономических параметров накопителей энергии, однако отсутствовал комплексный подход, который должен учитывать технические параметры локомотива, показатели эксплуатации, переходные режимы работы, комбинации нескольких разнотипных накопителей и стоимостные показатели.

Поэтому в работе были усовершенствованы методы и модели определения технико-экономических показателей комбинированных накопителей энергии с целью адаптации их к маневровому локомотиву ЧМЭЗ с учетом комплексного подхода.

В ней формализовано задачу выбора технико-экономических параметров накопителей энергии для маневрового тепловоза. Также разработана имитационная модель работы маневрового тепловоза с комбинированным накопителем энергии в силовой цепи, определены оптимальные параметры комбинированного накопителя энергии с учетом условий эксплуатации и переходных режимов в силовой цепи. На основе моделей разработан программный комплекс для расчета технико-экономических характеристик маневрового тепловоза ЧМЭЗ с комбинированным накопителем энергии.

Разработана модель определения эффективности от внедрения комбинированного накопителя энергии на маневровых тепловозах серии ЧМЭЗ с учетом вида маневровой работы, которая учитывает технические, экономические и экологические показатели работы маневрового локомотива.

**Ключевые слова:** модернизация маневрового тепловоза, режимы работы, параметры эксплуатации, оптимизация, энергетическая установка, комбинированный накопитель энергии, имитационное моделирование.

#### ANNOTATION

**Yaroyvi R. O. Increasing the operational characteristics of shunting locomotives through the use of combined energy storage. The qualification scientific work on the rights of the manuscript.**

The dissertation for a candidate degree in technical sciences (Doctor of Philosophy) by specialty 05.22.07 – “Rolling stock of railways and traction of trains” (273 - Railway transport). - Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Severodonetsk, 2019.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific task - improving the performance of upgraded shunting locomotives through the use of combined energy storage. It formalizes the problem of choosing the technical and economic parameters of energy storage for a shunting locomotive. It is also developed a simulation model of the work of a shunting locomotive with combined energy storage in the power circuit, it is determined the optimal parameters of the combined energy storage taking into account the operating conditions and transitional modes in the power circuit. Based on the models, it is developed a software complex to calculate the technical and economic characteristics of the CHME3 shunting locomotive with a combined energy storage.

**Keywords:** shunting locomotive, operating modes, performance characteristics, hybrid power plant, combined energy storage, simulation modeling.

Підписано до друку 30.10.2019 р.  
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний. Гарнітура Times.  
Друк офсетний. Умов. друк. арк. 0,9.  
Тираж 100 прим. Зам. № 23  
Видавництво Східноукраїнського національного університету  
імені Володимира Даля  
93406, м. Северодонецьк, пр. Центральний, 59-а

Дільниця оперативної поліграфії  
Східноукраїнського національного університету  
імені Володимира Даля  
93406, м. Северодонецьк, пр. Центральний, 59-а

**Адреса видавництва:** 93406, м. Северодонецьк, пр. Центральний, 59-а  
**Телефон:** (06452) 44-118. **Факс:** (06452) 40-342  
**E-mail:** uni.snu.edu@gmail.com; <http://snu.edu.ua>