

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна



ГУБСЬКИЙ ПЕТРО ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 621.331.621.316

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ
ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ
ШВИДКІСНОМУ РУСІ**

**Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт
галузь знань 27 – транспорт**

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

Дніпро – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Кузнецов Валерій Геннадійович,
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України, професор кафедри інтелектуальних систем електропостачання.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Любарський Борис Григорович,
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, завідувач кафедри електричного транспорту та тепловозобудування;

кандидат технічних наук, доцент
Божко Володимир Вячеславович,
старший науковий співробітник, заступник начальника Харківського відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Укрзалізниця».

Захист відбудеться 02.07.2019 р. о 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна або за посиланням: <http://ndch.diit.edu.ua/ua/sections/newzashchityd08-820-01/>

Автореферат розісланий 01.06.2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 08.820.01

д-р техн. наук, професор



А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зараз у світі та в Україні скорочуються запаси паливно-енергетичних ресурсів. Недостатня кількість органічного пального та постійне зростання тарифів на нього спонукають до збільшення енергетичної ефективності на етапах генерації, передачі та споживання палива в усіх галузях.

Однією з базових умов для сталого багатства та процвітання країн Європи та України зокрема є ефективний транспорт. Незважаючи на те що залізничний транспорт на сьогодні вже має більшу енергетичну ефективність порівняно з іншими видами транспорту, здебільшого завдяки зниженому опору руху й керованому графіку, для того щоб залишитися конкурентоспроможними в економічному плані з мінімальним негативним впливом на навколишнє середовище, залізниці надалі повинні підвищувати цей показник. Виділяють три основні причини, які спонукали залізничний сектор запроваджувати енергоощадні технології:

1. Зростання цін на енергоносії.

2. Енергетична безпека й незалежність.

3. Захист від зміни клімату. Семе протидія зміни клімату стала одним із стратегічних завдань для залізниць у Європейському Союзі.

Підвищення ефективності передачі електричної енергії в системах тягового електропостачання є важливою ланкою в загальній проблемі збільшення енергетичної ефективності залізничного транспорту. На сьогодні системи тягового електропостачання еволюціонують у напрямку інтелектуалізації та створення Smart-grid систем.

Електрифікація залізниць у Радянському Союзі відбулася в другій половині 20-го століття. Силові обладнання було розраховане на тогочасні розміри руху. Зараз реалії, на жаль, змінилися і обладнання систем тягового електропостачання працює не в раціональних режимах. До того ж основне силове обладнання систем тягового електропостачання постійного струму залізниць перебуває на етапі інтенсивного зносу. З іншого боку, зростають навантаження на систему тягового електропостачання постійного струму, що викликані впровадженням швидкісного руху.

На сьогодні одним з найперспективніших засобів підвищення енергетичної ефективності системи тягового є впровадження систем розподіленого живлення. На нашу думку, у сучасних умовах на залізницях України потрібно впроваджувати такі енергоощадні заходи, які не потребують значних інвестицій і вписуються в існуючу інфраструктуру тягового електропостачання. Тому тема роботи, яка пов'язана з підвищенням енергетичної ефективності систем тягового електропостачання постійного струму при організації швидкісного руху, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами й темами. Робота виконана відповідно до таких державних програм:

1. Стратегії сталого розвитку «Україна – 2020», схваленої указом Президента України від 12 січня 2015 року № 5/2015, – у частині зниження енергоємності

валового внутрішнього продукту (на 20 відсотків до кінця 2020 року), переходу до використання енергоефективних технологій та обладнання.

2. Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р, – у частині впровадження системи енергетичного менеджменту, зниження втрат енергії під час її передачі та розподілу; зниження енергоємності ВВП; забезпечення енергетичної незалежності України.

3. Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, схваленої Постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2009 р. N 1390 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 1106 від 26.10.2011, № 1146 від 09.11.2011, № 970 від 24.10.2012), – у частині зменшення обсягу питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів.

Ці дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за такими науково-дослідними темами:

- «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» (№ ДР 0115U002311),

- «Енергоефективна технологія розподіленої передачі електроенергії транспортним засобам» (№ ДР 0118U006261).

Результати дисертаційної роботи отримано внаслідок виконання вказаних досліджень, у яких дисертант був виконавцем і співавтором звітів з науково-дослідних робіт.

Мета роботи та завдання досліджень. Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання постійного струму шляхом перерозподілу потужності в системі розподіленого живлення.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі наукові завдання:

1. Виконати експериментальне дослідження режимів напруги та потужності в системі тягового електропостачання постійного струму.

2. Розробити концепцію побудови енергоефективної системи розподіленого живлення для забезпечення швидкісного руху.

3. Здійснити оцінку енергетичних процесів та енергетичної ефективності в пропонованій системі розподіленого живлення. Оцінити стійкість (за напругою) роботи запропонованої розподіленої системи.

4. Обґрунтувати раціональні місця розташування датчиків у системі розподіленого вимірювання напруги.

5. Виконати техніко-економічне порівняння класичної централізованої системи живлення з запропонованою енергоефективною системою розподіленого живлення.

Об'єкт дослідження – процес передачі та розподілення електричної енергії в системах тягового електропостачання постійного струму.

Предмет дослідження – системи тягового електропостачання постійного струму при організації швидкісного руху.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано: статистичний аналіз для дослідження режимів напруги та потужності в системі тягового

електропостачання постійного струму в режимах тяги та рекуперації; метод імітаційного моделювання – при розробці наукових принципів побудови енергоефективної системи розподіленого живлення для організації швидкісного руху та при моделюванні активного перетворювача; рекурентний аналіз часових рядів – для аналізу стійкості системи тягового електропостачання; методи сенсорних вузлів та Френеля – для визначення місць розташування датчиків у розподіленій системі вимірювань напруги. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням прикладних програмних засобів MS Excel, MathCad та Matlab. Імітаційне моделювання здійснювалося за допомогою програмного комплексу iSET та в програмному середовищі Matlab.

Наукова новизна отриманих результатів. До основних наукових результатів, які отримані автором особисто й виносяться на захист, належать такі положення:

1. Вперше розроблено концепцію побудови енергоефективних систем розподіленого живлення з установленням одноагрегатної підстанції на місці поста секціонування, на основі чого забезпечуються: організація швидкісного руху, ефективніше використання встановленої потужності.

2. Вперше на основі нелінійного рекурентного аналізу створено модель процесу зміни струму й напруги в тяговій мережі, яка дозволяє виявити приховані складові процесу, оцінити якість процесів електроспоживання та області стійкої роботи системи тягового електропостачання.

3. Набув подальшого розвитку метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання на базі функцій опору в частині розрахунку раціональних відстаней між підстанціями, необхідних для забезпечення режиму сталого споживання потужності під час руху електрорухомого складу із заданим рівнем втрат напруги, що дозволяє забезпечити енергоефективні режими систем тягового електропостачання.

4. Набув подальшого розвитку метод забезпечення стійкості роботи систем тягового електропостачання постійного струму в частині використання нелінійного закону управління, що дає змогу формалізувати умови забезпечення регулятивної спроможності цієї системи.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Запропонована концепція побудови розподілених систем живлення дозволяють здійснювати перехід від системи централізованого живлення до розподіленої системи зі збереженням існуючої інфраструктури живлення тягової мережі, що дає змогу підвищити енергетичну ефективність передачі електроенергії на тягу поїздів без значних капітальних вкладень.

2. Впровадження системи розподіленого живлення дозволяє забезпечити необхідний рівень потужності в тяговій мережі в межах 2,00 – 2,15 МВт/км, що дає змогу обмежити мінімальне значення напруги на струмоприймачі електрорухомого складу на рівні 2 900 В, зменшити: навантаження на проводи контактної мережі, неактивну потужність та втрати потужності в тяговій мережі, витрати електроенергії на 4-5 % від спожитої електроенергії на тягу поїздів за

умови дотримання нормативних значень напруги та питомої потужності в тяговій мережі.

3. Запропоновані принципи регулювання напруги в розподіленій системі живлення на базі нелінійного регулятора дозволяють застосовувати закони управління з кращою робастністю, що забезпечує необхідний рівень напруги в контактній мережі в усіх режимах при організації швидкісного руху.

4. Використання сенсорного методу та методу Френеля дозволяє обрати відстані між датчиками напруги, радіус покриття антен для забезпечення резервування передачі інформації й стабільної роботи систем розподіленого живлення.

5. Запропоновані нелінійні закони управління активним випрямлячем напруги дозволяють компенсувати просадку вхідної напруги в межах $\pm 20\%$ та забезпечити стійкість до різного роду збурень в умовах взаємодії системи тягового електропостачання та електрорухомого складу.

6. Результати дисертаційної роботи впроваджені в ТОВ «ДАК-Енергетика», Регіональна Філія «Львівська залізниця», проектно-вишукувальному інституті «Дніпрогіпротранс» та в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Особистий внесок здобувача. Постановка мети та завдань дослідження виконана спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, виконані в дисертаційній роботі, отримані дисертантом самостійно. У працях, які написані в співавторстві, автору належать: [1] – вибір підходів та розробка моделей для забезпечення стійкості систем електропостачання постійного струму на основі нелінійного рекурентного аналізу; [3] – розрахунок потенціалу енергозбереження за рахунок рекуперації; [4] – виконання експерименту та статистична обробка результатів; [5] – статистична обробка результатів експерименту, дослідження ефективності рекуперації; [6] – оцінка додаткових втрат потужності в розподілених системах електропостачання постійного струму; [7] – дослідження чутливості релейного захисту в розподілених системах тягового електропостачання; [8] – дослідження режимів потужності швидкісного рухомого складу; [10] – статистична обробка результатів експерименту; [12] – принципи керування потужністю за допомогою використання інтелектуального обладнання; [13] – порівняльний аналіз режимів у централізованих та розподілених системах тягового електропостачання; [14] – дослідження ефективності керування потужністю в системах електропостачання в умовах швидкісного руху; [15] – дослідження впливу напруги на вході підстанції на енергетичні характеристики системи тягового електропостачання; [16] – розробка моделей систем тягового електропостачання; [17] – оптимізація режиму функціонування системи тягового електропостачання за заданих обсягів перевізної роботи та в умовах швидкісного руху; [18] – розрахунок енергетичної ефективності в розподілених системах живлення під час керування режимами; [19] – розробка енергооптимальної технології розподіленої передачі потужності; [21] – розробка моделі залежності струму від напруги для задач дослідження стійкості. Праці [2, 9, 11, 20] написані самостійно, без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і були схвалені на таких вітчизняних та міжнародних конференціях: 75-та Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», Дніпропетровськ, 2015; VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», Воловець, 2015; Міжнародна науково-практична конференція «Транселектро–2015», Одеса; Міжнародна науково-практична конференція «Оптимальне керування електроустановками – 2015», Вінниця; IV Międzynarodowa Konferencja „Najnowsze technologie w transporcie szynowym”, Warszawa, 2015; Міжнародна науково-практична конференція «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті», Розлуч, 2016; I Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології перевізного процесу», Моршин, 2016; II Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології перевізного процесу», Дніпропетровськ, 2018; VI Międzynarodowa Konferencja «Najnowsze Technologie W Transporcie Szynowym», Warszawa, 2017; Міжнародна науково-практична конференція «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті», Львів, 2018.

Публікації. Основний зміст дисертації опублікований у 21 науковій праці та матеріалах конференцій: 9 основних праць, з них: 1 – стаття в журналах, що індексуються Scopus, 1 – стаття в закордонних виданнях, 7 – статей у фахових виданнях; і 12 додаткових, з них: 12 – тези доповідей та матеріали конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації українською та англійською мовами, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Основний текст роботи викладено на 139 сторінках, містить 82 рисунки за текстом і 24 таблиці. Список літературних джерел із 162 найменувань займає 18 сторінок. Додатки займають 33 сторінки. Повний обсяг дисертації становить 209 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету й завдання досліджень, наведено основні наукові положення й результати, що винесені на захист, а також подано відомості про практичне значення результатів роботи, апробацію й публікації матеріалів досліджень.

У першому розділі проаналізовано завдання підвищення енергетичної ефективності в системах тягового електропостачання постійного струму. Розглянуто показники енергоефективності. Досліджено режими потужності й напруги. Проаналізовано сучасні методи підвищення енергоефективності систем тягового електропостачання (СТЕ).

Великий внесок у дослідження та розробку заходів з підвищення енергоефективності в тягових системах зробили: П. Д. Андрієнко, Б. О. Аржанніков, М. П. Бадьор, В. Д. Бардушко, С. В. Власьєвський, Л. А. Герман, Г. К. Гетьман, Ю. П. Гончаров, О. Г. Гриб, В. Т. Доманський, В. П. Закарюкін, М. О. Костін, В. Г. Кузнецов, Р. Р. Мамошин, А. М. Марикін, К. Г. Марквардт, Г. Г. Марквардт, Р. І. Мірошніченко, М. В. Панасенко, Е. С. Почаєвець, В. Г. Сиченко,

О. І. Стасюк, В. Т. Черемісін, Н. Akagi, A. D. Graham, R. Lamedica, A. Mariscotti, A. Rojek, A. Szelag, V. Calderaro, V. Galdi, Zheng Xu та інші.

Встановлено, що для систем тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі можуть бути використані такі показники енергетичної ефективності: коефіцієнт корисної дії 0.92 ; коефіцієнт завантаження тягових підстанцій (або, по-іншому, коефіцієнт використання наявної агрегатної потужності); коефіцієнт потужності, втрати електроенергії. Експериментально досліджені режими потужності та напруги в системах тягового електропостачання постійного струму: на тягових підстанціях, постах секціонування та на струмоприймачах електрорухомого складу (ЕРС). Дослідження режимів роботи тягової мережі та споживаної електровозами потужності виконувалися на Придніпровській залізниці на ділянках: НД Вузол – П’ятихатки, НД Вузол – Демуріно, Синельникове – Демуріно. Аналіз отриманих результатів показує, що в тяговій мережі існують зони обмеженого електроспоживання, тобто зони, де споживана потужність ЕРС перевищує можливості СТЕ з передачі необхідного рівня потужності. У свою чергу, це призводить до різкого зниження напруги на струмоприймачах електровозів нижче допустимого значення (2 900В), внаслідок чого відбувається зменшення швидкості руху, що неприйнятне при впровадженні швидкісного руху (фрагмент дослідження наведено на рис. 1). При цьому парадоксальним є факт, що встановлена агрегатна потужність тягових підстанцій використовується не повною мірою (від 2 до 14 % для досліджуваної ділянки, табл. 1).

Таблиця 1 – Фрагмент завантажень тягових підстанцій

Тягова підстанція	Встановлена потужність P_B , кВт	Середня споживана потужність P_C , кВт	Коефіцієнт завантаження K_3 , %
ТП 1 (Верх)	20 800	2 868	13,7
ТП 2 (Ер)	20 800	1 080	5,2
ТП 3 (Варв)	19 800	956	4,8
ТП 4 (Сам)	19 800	422	2,1

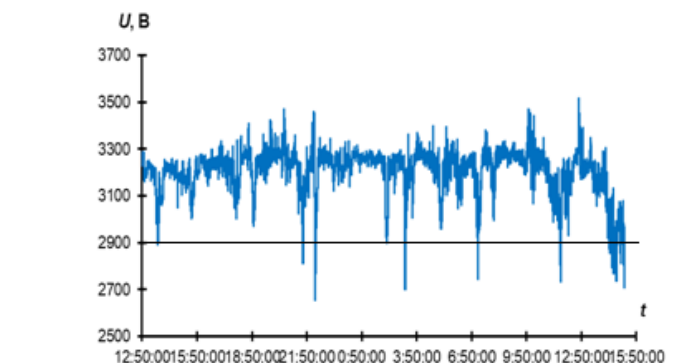


Рисунок 1 – Напруга на ПСК Вишневецьке під час експерименту

експерименту

Наголошено, що всі системи тягового електропостачання розвиваються в напрямку інтелектуалізації переходу до Smart-Grid технологій, а в умовах обмеження доступу до інвестиційних ресурсів необхідно використовувати такі методи, що не потребують значних капітальних вкладень і вписуються в існуючу інфраструктуру.

У другому розділі теоретично досліджено способи підвищення енергетичної ефективності в розподілених системах тягового електропостачання. Проаналізовано існуючі методи підвищення ефективності розподілених систем тягового електропостачання. Запропоновано концепцію розподіленої системи зі збереженням існуючої інфраструктури живлення тягової мережі, а саме: розта-

шування тягових підстанцій на місці існуючих, а одноагрегатних підстанцій на постах секціонування. Був модернізований метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання на основі функції опору в частині знаходження раціональних відстаней між тяговими підстанціями. Схема розподіленої системи живлення наведена на рис. 2.

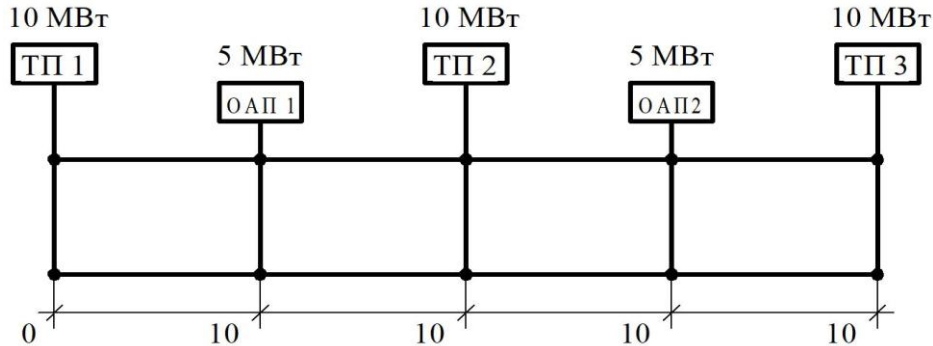


Рисунок 2 – Пропонована схема системи розподіленого живлення

Втрати напруги до струмоприймача ЕРС, що розташований на розрахунковій міжпідстанційній зоні (МПЗ) за умови споживання ним сталої потужності, розраховуються так:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{ш}} - \sqrt{U_{\text{ш}}^2 - 4f(x)P}}{2f(x)} \cdot f(x), \quad (1)$$

де $U_{\text{ш}}$ – напруга на шинах тягової підстанції, В; $f(x)$ – функція опору розрахункової МПЗ; P – потужність, яку споживає ЕРС, Вт.

У наведеному виразі функція опору визначає схему живлення МПЗ. Зважаючи на те що при розподіленій системі електропостачання схема живлення МПЗ буде двосторонньою, функція опору для двосторонньої схеми:

$$f(x) = r_0 \left(x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (2)$$

де r_0 – питомий опір тягової мережі, Ом; x – відстань від ТП до ЕРС, км; L – довжина МПЗ, км. Раціональна відстань між тяговими підстанціями, на яку можна передати потужність для живлення ЕРС при заданому рівні втрат напруги в тяговій мережі знаходиться за виразами (3,4). Допустима відстань передачі потужності наведена на рис. 3. Для першої й другої ТП:

$$x_1 = - \frac{L \left(\frac{\sqrt{P \cdot r_0 \cdot (4\Delta U^2 - 4U_{\text{ш}}\Delta U + LPr_0)}}{2} - \frac{Pr_0}{2} \right)}{Pr_0}, \quad (3)$$

$$x_2 = \frac{L \left(\frac{\sqrt{P \cdot r_0 \cdot (4\Delta U^2 - 4U_{\text{ш}}\Delta U + LPr_0)}}{2} + \frac{Pr_0}{2} \right)}{Pr_0}, \quad (4)$$

У цих розрахунках використовувалися такі вихідні дані: напруга на шинах ТП 3 300 В, довжина МПЗ 20 км, допустимі втрати напруги 400 В, тягова мережа М120+2МФ100+А185+Р65, споживана потужність ЕРС 10 МВт.

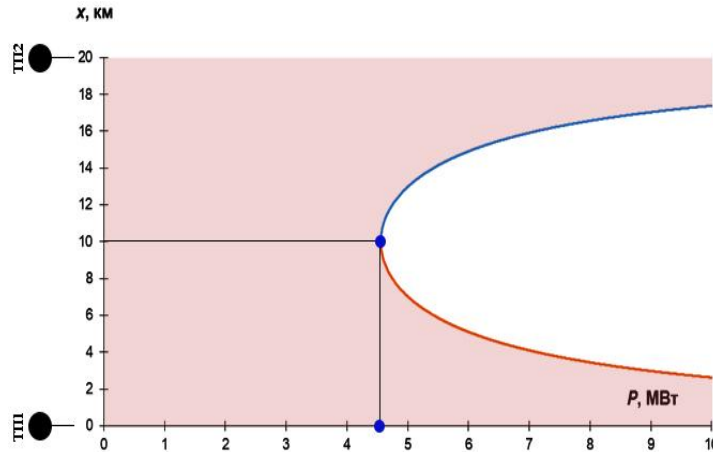


Рисунок 3 – Допустима відстань передачі потужності

У результаті виконаного аналізу встановлено, що для побудови системи розподіленого живлення на сучасному етапі найбільш доцільним є використання на перегонах одноагрегатних тягових підстанцій з живленням їх ліній поздовжнього електропостачання, виконаних проводами АС-70, напругою 35 кВ. Запропоновано застосування в розподіленій системі живлення на тяговій підстанції двох перетворювальних агрегатів загальною потужністю 10 МВт, а для одноагрегатної підстанції – 5 МВт.

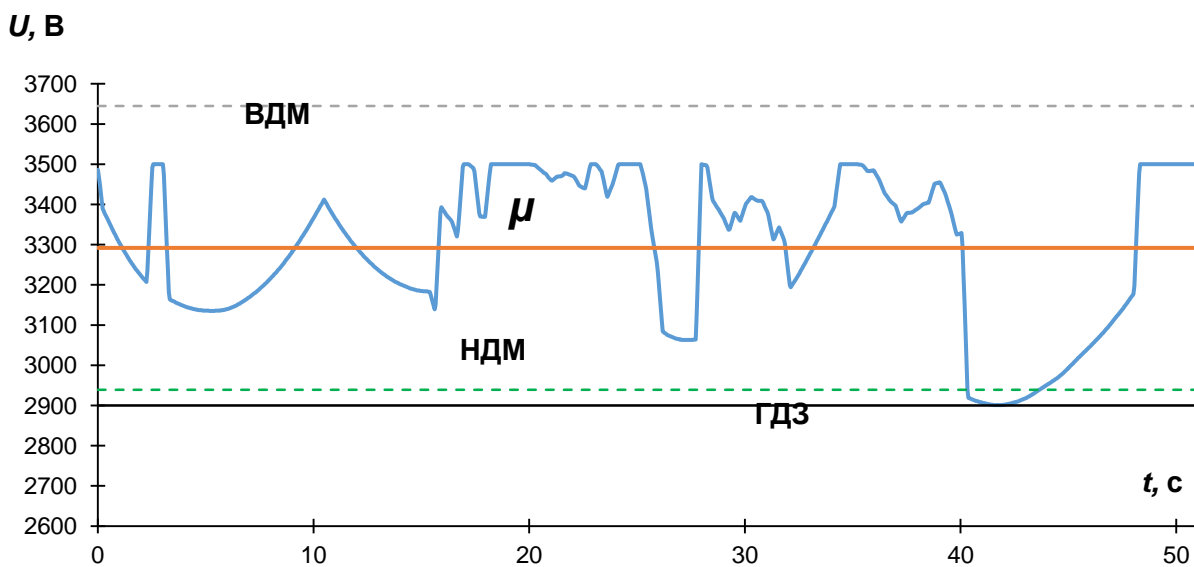
У третьому розділі виконано оцінку якості енергетичних процесів у існуючій централізованій та запропонованій розподіленій системах тягового електропостачання. Встановлено, що при розподіленій системі існує запас навантажувальної здатності практично для всіх контактних підвісок. Досліджено втрати потужності та енергії при централізованій та розподіленій системах живлення; стійкість системи розподіленого живлення. За допомогою нелінійного рекурентного аналізу було запропоновано лінійний і нелінійний закон керування. За критерієм Гурвіца встановлено, що зона стійкої роботи для нелінійного закону керування значно ширша.

У розрахунках приймалося, що ділянкою рухається поїзд із середньою швидкістю 160 км/год, середньою споживаною потужністю 4,2 МВт та піковою потужністю 8,8 МВт. Розрахунки рівня напруги виконувалися на математичній моделі, з можливістю урахування взаємного впливу кожного навантаження, та на суміжній коліях залежно від схеми живлення:

$$U_j(x) = U_{III} - I_j(x) \cdot f_R(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n_1} \Delta U'_k(x, x_k) - \sum_{k=n_1}^{n_1+n_2} \Delta U''_k(x, x_k), \quad (5)$$

де k – номер навантаження на відповідній колії; n_1, n_2 – кількість навантажень на 1-й та 2-й коліях; $\Delta U'_k(x, x_k)$ – функція розподілу спаду напруги від k -го навантаження на попутній колії, В; $\Delta U''_k(x, x_k)$ – те саме на суміжній колії, В.

У результаті розрахунку мінімальне значення напруги на струмоприймачі становило 2 652 В, що зумовлено складним профілем розрахункової ділянки та різким зростанням тягової потужності для підтримання сталої швидкості руху поїзда. Навіть якщо математичне сподівання було вищим за номінальне значення, рівень напруги не відповідав нормованим значенням, довірчий діапазон її зміни становив 875 В, а його нижня межа виходила за гранично допустимий рівень напруги для швидкісного руху – 2 900 В (рис. 4). Для оцінки режиму напруги при розподіленому живленні розрахунки виконувалися за аналогічних умов руху поїзда та параметрів колії. Відмінність полягала в схемі живлення тягової мережі. Для розподіленої системи живлення були обрані керовані перетворювальні агрегати ПА-5200: по 2 агрегати на кожній тяговій підстанції та по одному агрегату на посту секціонування.



ВДМ – верхня довірча межа; НДМ – нижня довірча межа; ГДЗ – гранично-допустиме значення; μ – математичне сподівання

Рисунок 4 – Напруга на струмоприймачі ЕРС при розподіленій системі живлення

При розподіленій системі живлення напруга на струмоприймачі ЕРС була в межах допустимих значень, довірчий інтервал її зміни становив 705 В при середньому значенні 3 291 В (див. рис. 4). Сумарна встановлена потужність тягових підстанцій при централізованому живленні становить 56,7 МВт, сумарна встановлена потужність агрегатів при розподіленому живленні – 41,6 МВт. У табл. 2 наведено результати аналізу систем централізованого та розподіленого живлення.

Оціночні розрахунки показали, що в разі проходження одного швидкісного поїзда розрахунковою ділянкою із заданими параметрами впровадження системи розподіленого живлення дозволяє: забезпечити необхідний рівень питомої потужності в тяговій мережі в межах 2,00–2,15 МВт/км, що дало змогу обмежити мінімальне значення напруги на струмоприймачі ЕРС на рівні 2 900 В, зменшити навантаження на проводи контактної мережі за рахунок децентралізації джерел живлення, зменшити неактивну потужність та втрати потужності в тяговій мережі за рахунок покращення режиму напруги в системі

тягового електропостачання, досягти економії електроенергії у розмірі 57,2 кВт-год, що становить 4,3 % спожитої поїздом електроенергії.

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз параметрів СЦЖ та СРЖ

Показник		Централізоване живлення	Розподілене живлення
Режим напруги на струмоприймачі ЕРС, В	$M(U)$	3 130	3 291
	$\max(U)$	3 418	3 500
	$\min(U)$	2 643	2 901
	Величина довірчого інтервалу зміни	875	705
Витрати електроенергії на тягу, кВтгод		1 495	1 437
Середні втрати потужності, кВт	Без урахування вищих гармонік	524	372
	З урахуванням вищих гармонік	631	428
Втрати електроенергії, кВт-год	Без урахування вищих гармонік	174,9	123,9
	З урахуванням вищих гармонік	210,6	142,7
ККД		0,92	0,95

У розділі також виконано аналіз стікості запропонованої системи розподіленого живлення. На електрифікованій ділянці НДВ-П в результаті експериментального дослідження було побудовано часові залежності для струму й напруги в контактній мережі. Для цього було проведено 12 470 вимірів з інтервалом 1 секунда. Для успішного виконання моделювання процесів, наведених на рис. 5, були використані методи нелінійного рекурентного аналізу.

Перший крок такого моделювання – визначення розмірності вкладення фазового простору, де відбувається

процес. Далі внаслідок застосування методу найменших квадратів отримали таку систему диференціальних рівнянь (7):

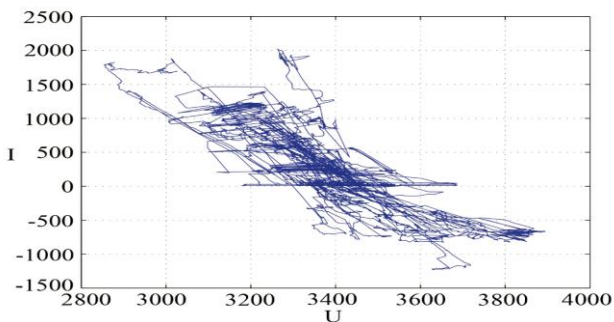


Рисунок 5 – Вольт-амперна ($U-I$) характеристика контактної мережі (експериментальні дані)

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= y(t), \\
 \dot{y}(t) &= 0,0193 - 0,0072x(t) + 0,0218y(t) - \xi_1 z(t) + \\
 &0,0057u(t) - \xi_2 x(t)y(t) + 0,000422x^2(t), \\
 \dot{z}(t) &= u(t), \\
 \dot{u}(t) &= 0,0294 - 0,0145x(t) - 0,8506y(t) - 0,0019z(t) - \\
 &- 0,0095u(t) + 0,2380x(t)y(t) + 0,0017x^2(t).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Тут $x(t) = U(t)$, $z(t) = I(t)$, ε_1 , ε_2 – керуючі параметри; напруга $U(t)$ і струм $I(t)$ вимірюються в кіловольтах (кВ) і кілоамперах (кА).

Крім того, ми будемо вважати, що управління напругою здійснюється за допомогою регулятора $U_{input}(s) = f(U(s), U'(s), I(s), I'(s))$, де $f(\dots)$ – дійсна функція своїх аргументів. Таким чином, перехід від моделі, у якій $x(t)$ і $z(t)$ представлені як функція часу t , досягнутий за допомогою заміни незалежної змінної t незалежною змінною s , згідно з формулою $s = vt$. У цьому випадку $u(t) \rightarrow vu(s)$, $u(t) \rightarrow vu(s)$, і система (7) переходить у таку систему:

$$\begin{aligned} \dot{x}(s) &= y(s), \\ \dot{y}(s) &= (a_{10} + a_{11}x(s) + a_{12}vy(s) + a_{13}z(s) + \\ &+ a_{14}vu(s) + b_{12}vx(s)y(s) + b_{11}x^2(s) + U_{input}(s)) / v^2, \\ \dot{z}(s) &= u(s), \\ \dot{u}(s) &= a_{20} + a_{21}x(s) + a_{22}vy(s) + a_{23}z(s) + \\ &+ a_{24}vu(s) + b_{21}vx(s)y(s) + b_{22}x^2(s) + I_{input}(s) / v^2. \end{aligned} \quad (8)$$

де швидкість $v = const$ вимірюється в метрах за секунду (м/с) і $U(s) = x(s)$, $I(s) = z(s)$ – деякі функції відстані. Для простоти в отриманій системі збережено колишні позначення залежних змінних x і z . Змінні $x(t)$ і $z(t)$ замінені змінними $x(s)$ і $z(s)$. Уведемо в систему (8) закон управління за формулою:

$$\begin{aligned} U_{input}(s) &= (-0,00088 + \text{piecewise}(s < 10000, 0, k_1))I(s) + \\ &+ (0,0057 + \text{piecewise}(s < 10000, 0, k_2))vI(s) + (-0,0039 + \\ &+ \text{piecewise}(s < 10000, 0, k_3))vU(s)U(s) \equiv \\ &\equiv -0,00088 + \text{piecewise}(s < 10000, 0, k_1)z(s) + \\ &+ (0,0057 + \text{piecewise}(s < 10000, 0, k_2))vU(s) + \\ &+ \text{piecewise}(s < 10000, 0, k_2))vU(s) + \\ &+ (-0,0039 + \text{piecewise}(s < 10000, 0, k_3))vx(s)y(s). \end{aligned} \quad (9)$$

де значення дійсної функції $f = \text{piecewise}(s < Dist; b; c)$ дорівнює b , якщо $s < a$, і c в протилежному випадку; $0 < Dist < 120000$ метрів.

Важливою проблемою є проблема робастності (нечутливості до малих збурень) побудованого регулятора. Вона є досить складною. Тому розглянемо тільки один з її аспектів.

Надалі під робастною системою (8) будемо розуміти запас стійкості цієї системи з побудованим регулятором (система замкнута зворотним зв'язком). Цей запас стійкості може бути визначений на основі побудови областей стійкості. Уведемо в систему (8) закон управління $U_{input} = k_1 U(t) - U(t) = k_1 x(t) y(t)$ та $I_{input} = k_2 U(t) - U(t) = k_2 x(t) y(t)$, де k_1 , k_2 – дійсні параметри. Тоді маємо таку замкнуту систему:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= y(t), \\
 \dot{y}(t) &= 0,0193 - 0,0072x(t) + 0,0218y(t) - 0,00088z(t) + \\
 &+ 0,0057u(t) - (0,0039 + k_1)x(t)y(t) + 0,000422x^2(t), \\
 \dot{z}(t) &= u(t), \\
 \dot{u}(t) &= 0,0294 - 0,0145x(t) - 0,8506y(t) - 0,0019z(t) - \\
 &- 0,0095u(t) + (0,2380 + k_2)x(t)y(t) + 0,0017x^2(t).
 \end{aligned} \tag{10}$$

Тепер уведемо в систему (8) закон управління $U_{input}=k_1I(t)=k_1z(t)$ та $I_{input}=k_2I(t)=k_2z(t)$, де $k_1; k_2$ – дійсні параметри. Область стійкості визначається умовами (11). У цьому випадку також формуємо поліноми Гурвіца:

$$\begin{aligned}
 \Delta 1 (k_1, k_2) &> 0, \\
 \Delta 2 (k_1, k_2) &> 0, \\
 \Delta 3 (k_1, k_2) &> 0, \\
 \Delta 4 (k_1, k_2) &> 0.
 \end{aligned} \tag{11}$$

У площині параметрів k_1, k_2 область стійкості для нелінійного закону $U_{input}=k_1U(t)$ $U'(t)=k_1x(t)y(t)$ та $I_{input}=k_2U(t)$ $U'(t)=k_2x(t)y(t)$ наведена на рис. 6.

У площині параметрів k_1, k_2 область стійкості для лінійного закону управління $U_{input}=k_1I(t)=k_1z(t)$ і $I_{input}=k_2I(t)=k_2z(t)$ наведена на рис. 7.

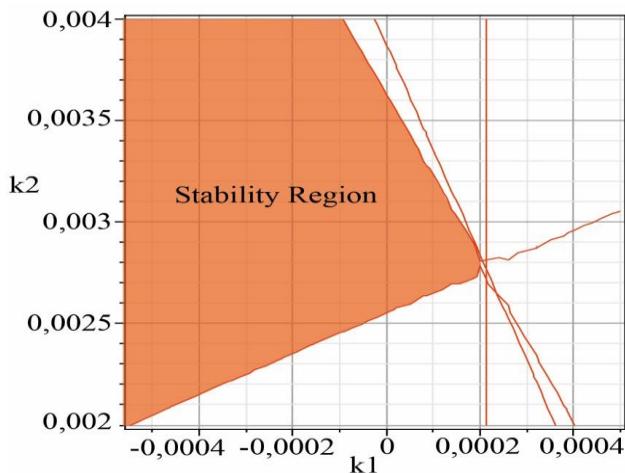


Рисунок 6 – Область стійкості для системи (7) для нелінійного закону управління $U_{input}=k_1U(t)$ $U'(t)=k_1x(t)y(t)$ і $I_{input}=k_2U(t)$ $U'(t)=k_2x(t)y(t)$

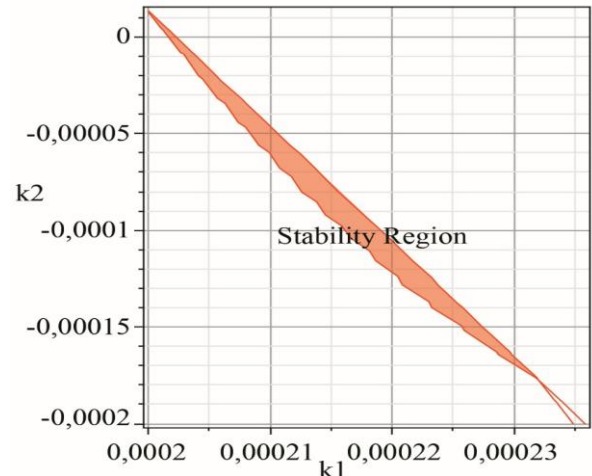


Рисунок 7 – Область стійкості для системи (7) для лінійного закону управління $U_{input}=k_1I(t)=k_1z(t)$ і $I_{input}=k_2I(t)=k_2z(t)$

Таким чином, як впливає з наведених рисунків, область стійкості лінійного регулятора досить мала, а нелінійний регулятор має кращі робастні властивості.

У четвертому розділі розроблена концепція системи контролю та вимірювання рівня напруги в розподіленій системі живлення. Запропоновано використання активного випрямляча та змодельована його робота в різних режимах. Досліджено роботу розподіленої системи в нормальному та вимушеному режимах.

Для визначення місця розміщення датчика напруги в системі контролю та

вимірювання в роботі запропоновано використати метод сенсорних вузлів. Були виконані моделювання з такими вихідними даними: розрахункова ділянка двоколійна, довжина 50,8 км, має 4 міжпідстанційні зони та отримує живлення від трьох тягових підстанцій за вузловою схемою, додатково на постах секціонування розміщені одноагрегатні тягові підстанції. Тягові підстанції мають однакову напругу на шинах 3 300 В, тягова мережа по всій довжині однакова – М120+2МФ100+А185+Р65. Сенсорність вузлів досліджувалася з дискретністю 1 км. На ділянці графіки руху трьох пар поїздів реалізовані таким чином, що реакції сенсорних вузлів визначалися спочатку окремо від кожного навантаження, потім з поступовим ущільненням міжпоїздного інтервалу до 10 хв. Визначення сенсорних вузлів у системі здійснювалося таким чином:

1. Для кожного графіка руху, для кожного дискретного вузла розраховувалася зміна напруги (інтервал 1 хв) протягом реалізації графіка руху поїздів.

2. У кожній точці визначалося максимальне та мінімальне значення напруги, на основі яких були побудовані залежності рис. 8.

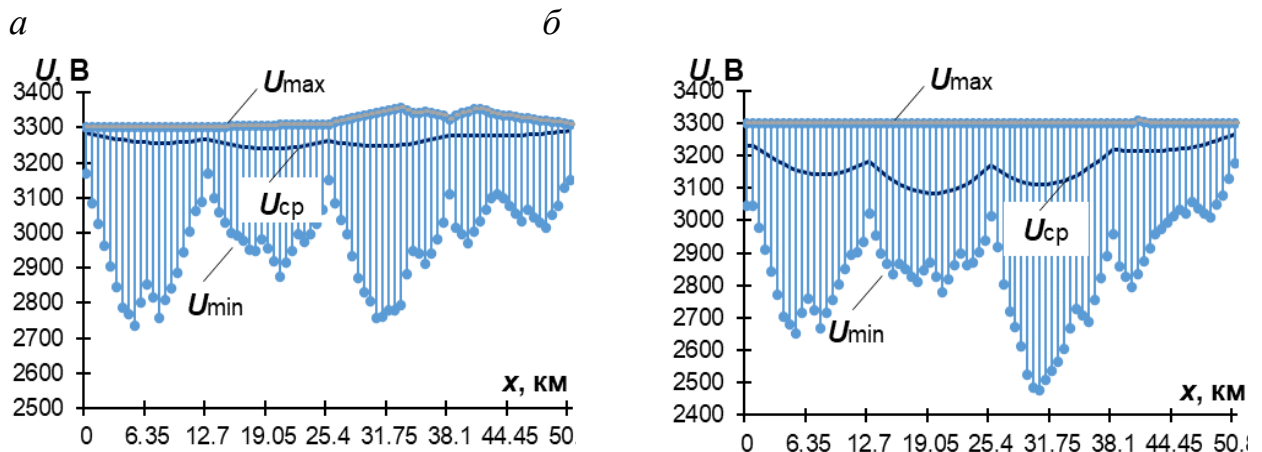
3. Точка з максимальною амплітудою коридору зміни напруги визначалася як найчутливіший сенсорний вузол для заданої ділянки схеми (для кожної МПЗ).

$$s = \max_{[a;b]} (U_{\max j} - U_{\min j}), \quad (12)$$

де a – координата початку ділянки; b – координата кінця ділянки; j – номер досліджуваного вузла; $U_{\max j}$ – максимальне значення напруги в j -му вузлі;

$U_{\min j}$ – мінімальне значення напруги в j -му вузлі.

Графіки зміни напруги наведені на рис. 8.



a – інтервал руху 80 хв, b – інтервал руху 10 хв

Рисунок 8 – Графік зміни напруги для ГРП

Для подальших розрахунків прийняті найслабкіші точки контактної мережі, що визначаються координатами: 5 км, 20,3 км, 30,5 км, 40 км. Перевірка довжини зони прямої видимості була виконана за методом Френеля.

У розділі наведено розрахунок енергетичних показників у системах розподіленого та централізованого живлення у нормальному та вимушеному режимах (табл. 3).

Таблиця 3 – Результати розрахунку енергетичних показників

Режими роботи	Схема живлення	Значення напруги, В			Втрати електроенергії, кВт-год
		мінімальне	середнє	максимальне	
Нормальний	Централізоване	2 643	3 130	3 418	174,9
	Розподілене	2 901	3 292	3 500	123,9
Вимушений	Централізоване	2 225	2 933	3 397	227,7
	Розподілене	2 687	3 144	3 500	170,7

У *п'ятому розділі* виконано оцінку економічної ефективності системи розподіленого живлення постійного струму. За розрахунком приведених щорічних витрат можна стверджувати, що в разі застосування системи розподіленого живлення досягається ефективне використання капітальних вкладень та мінімальні річні експлуатаційні витрати. Реалізація системи розподіленого живлення дозволяє щорічно економити на дослідній ділянці 2,879 млн грн за рахунок зменшення вартості витрат електричної енергії в системі живлення.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі теоретичних та експериментальних досліджень вирішене науково-прикладне завдання підвищення енергетичної ефективності систем тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі за рахунок розробки концепції побудови енергоефективної системи розподіленого живлення, яка забезпечує швидкісний рух і максимально вписується в існуючу інфраструктуру. Основні наукові результати та висновки полягають в такому.

1. Виконаний експериментальний аналіз режимів напруги та потужності в системі тягового електропостачання постійного струму показав, що рівні напруги на шинах дослідних тягових підстанцій мають широкий розкид значень та, за відсутності пристроїв регулювання напруги, не можуть забезпечити нормовану якість напруги на струмоприймачах електрорухомого складу. Напруга на шинах 3,3 кВ має різкозмінний характер, а її максимальні коливання сягають значення 1 300 В. Повна встановлена потужність тягових підстанцій дослідних ділянок перебуває в межах 12–50 МВт, але сучасний стан тягового електропостачання постійного струму характеризується зростаючим дефіцитом необхідної потужності для забезпечення швидкісного руху. При цьому коефіцієнт завантаження обладнання не перевищує 15 %.

2. Розроблено концепцію побудови енергоефективних розподілених систем тягового електропостачання постійного струму, які максимально вписуються в існуючу інфраструктуру: розташування двоагрегатних тягових підстанцій запропоновано здійснити на місці існуючих, одноагрегатних підстанцій – на постах секціонування. Це дозволило зменшити втрати енергії в тяговій мережі й в обладнанні підстанцій, поліпшити використання

встановленого обладнання до 50% на двоагрегатних підстанціях, підвищити коефіцієнт потужності та поліпшити умови захисту системи електропостачання. За рахунок зменшення втрат, розрахунковий ККД розглянутої системи збільшено з 0,92 до 0,95.

3. Вдосконалений метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання на базі функцій опору дозволив розраховувати потужності тягових підстанцій, які необхідні для забезпечення режиму сталого споживання потужності при русі електрорухомого складу із заданим рівнем втрат напруги. Розрахунками встановлено доцільність застосування на тягових підстанціях двох перетворювальних агрегатів загальною потужністю 10 МВт, а для одноагрегатної підстанції – одного перетворювального агрегату потужністю 5 МВт. Розрахунки показали, що запропонована система дозволяє забезпечити необхідний рівень питомої потужності в тяговій мережі в межах 2,00 – 2,15 МВт/км, що дало змогу обмежити мінімальне значення напруги на струмоприймачі ЕРС на рівні 2 900 В. При цьому діапазон зміни напруги на шинах тягових підстанцій зменшується на 120 В, а в тяговій мережі – на 170 В.

4. Запропонована на підставі експериментальних даних математична модель процесу зміни струму й напруги в тяговій мережі дозволяє оцінити якість процесів електроспоживання та області стійкої роботи розподіленої системи тягового електропостачання. Структура моделі розроблена з використанням нелінійного рекурентного аналізу, що дозволило виявити приховані складові процесу. Наприклад, крім вимірних струму й напруги, розраховувалися їх похідні. Це дає змогу описувати динамічні процеси в задачах аналізу ефективності функціонування системи тягового електропостачання.

5. Модернізований метод забезпечення стійкості роботи систем тягового електропостачання постійного струму на основі використання нелінійного закону управління дозволяє забезпечити необхідну стійкість за напругою в умовах організації швидкісного руху поїздів, а саме підтримання мінімальної допустимої напруги не нижче рівня 2900В. Розрахунками встановлено, що регулятор з нелінійним законом управління має кращу робастність, а зона стабілізації напруги в тяговій мережі в разі застосування нелінійного закону управління в 3-4 рази ширша, порівняно з використанням лінійного закону управління.

6. Для підвищення стійкості розробленої системи розподіленого живлення застосовано активний випрямляч напруги, який здійснює двоспрямоване перетворення енергії й забезпечує постійну напругу живлення незалежно від стану навантаження. Виконаними дослідженнями на Simulink-моделі доведено, що розроблений активний перетворювач компенсує просадку вхідної напруги в межах $\pm 20\%$ та стійкий до різного роду збурень, які виникають у процесі взаємодії системи тягового електропостачання та електрорухомого складу.

7. Для ефективного забезпечення коректною інформацією системи управління тяговим електропостачанням необхідним є створення розподіленої системи вимірювання напруги. Запропонований у роботі принцип розміщення

датчиків напруги на основі методу сенсорних вузлів та методу Френеля дозволяє раціонально їх розташувати та запобігти появі «мертвих» зон. На дослідній ділянці 50 км за розрахунками датчики запропоновано розташувати в найслабших точках: 10,6; 20,3; 21,6; 30,5; 33,9; 40; 50,8; гранична довжина зони прямої видимості датчиків знаходиться в межах від 15,9 до 22 км.

8. Техніко-економічні розрахунки показали, що запропонована енергоефективна розподілена система електропостачання тяги поїздів постійного струму, яка максимально вписується в існуючу інфраструктуру, дозволяє ефективно використовувати капітальні вкладення та досягти мінімальних річних експлуатаційних витрат. Реалізація запропонованої системи розподіленого живлення дозволяє щорічно економити на дослідній ділянці 2,879 млн грн за рахунок зменшення вартості витрат електричної енергії в системі живлення.

Основні положення та результати дисертації опубліковані:

У виданнях, що індексуються в Scopus:

1. V. Sychenko, V. Kuznetsov, Ye. Kosarev, P. Hubskeyi, V. Belozyorov, M. Pulin, V. Zaytsev, «Development of an approach to ensure stability of the traction direct current system», *Easten-European journal of enterprise technologies*, vol. 95, pp. 47-56, 2018.

У закордонних виданнях:

2. Hubskeyi P. V. «Reserves for improving the energy efficiency of traction power systems», *Problemy Kolejnictwa*, iss. 178, pp. 7-11, 2018.

У фахових виданнях:

3. В. Г. Кузнецов, О. И. Саблин, П. В. Губский, Е. Г. Колыхаев, «Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена», *Гірнична електромеханіка та автоматика*. наук.-техн. зб., № 95, с. 81-89, 2015.

4. В. Г. Сиченко, Є. М. Косарев, П. В. Губський, В. В. Замаруєв, В. В. Івахно, Б. О. Стисло, «Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму», *Електрифікація транспорту*, № 11, с. 61-70, 2016.

5. О. І. Саблін, Д. О. Босий, В. Г. Кузнецов, М. О. Баб'як, Є. М. Косарев, П. В. Губський, «Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 2(125), с. 73-79, 2016.

6. В. Г. Сиченко, Є. М. Косарев, П. В. Губський, А. В. Рогоза, «Оцінка додаткових витрат потужності у системах електропостачання швидкісного руху», *Електрифікація транспорту*, № 12, с. 59-63, 2016.

7. В. Г. Сиченко, Є. М. Косарев, О. А. Данилов, П. В. Губський, В. А. Зубенко, М. М. Пулін, «Особливості функціонування релейного захисту в розподілених системах тягового електропостачання», *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, № 9 (1285), с. 70-75, 2018.

8. P. Hubskeyi, V. Kuznetsov, A. Drubetskyi, A. Afanasov, M. Pulin, «Studying of the power modes in the traction line for ensuring the high-speed traffic», *Technology audit and production reserves*, 1 (43), pp. 42-51, 2018.

9. П. В. Губський, «Енергетичні канали живлення розподілених систем тягового електропостачання», *Електрифікація транспорту*, № 15, с. 23-30, 2018.

Додаткові праці

Тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій:

10. Саблін О. І., Кузнецов В. Г., Губський П. В., «Експериментальне дослідження ефективності застосування рекуперації електроенергії в умовах Дніпропетровського метрополітену», на *75 Міжнар. науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*, Дніпропетровськ, 2015, с.122-123.

11. Губський П. В., «Методи підвищення енергетичної ефективності систем тягового електропостачання», на *VI Міжнар. науково-практ. конф. «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості»*, Воловець, 2015, с. 46-47.

12. Губський П. В., Бусурулов А. І., «Удосконалення керування потужністю в тяговій мережі постійного струму при швидкісному русі», на *Міжнар. науково-практ. конф. «ТРАНСЕЛЕКТРО-2015»*, 2015, с. 25-26.

13. Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Губський П. В., «Оптимізація керування потужністю в тяговій мережі постійного струму при швидкісному русі», на *Міжнар. науково-практ. конф. «Оптимальне керування електроустановками – 2015»*, Вінниця, 2015, с. 50.

14. Sychenko Victor, Kuznetsov Valeriy, Hubskeyi Petro, «Power control in the traction DC current lines for high-speed movement», на *IV Międzynarodowa Konferencja „NAJNOWSZE TECHNOLOGIE W TRANSPORTCIE SZYNOWYM”*, Warszawa, 2015, pp. 127

15. Кузнецов В. Г., Саблін О. І., Губський П. В., «Вплив режимів системи зовнішнього електропостачання на ефективність рекуперації електроенергії поїздів» на *Міжнар. науково-практ. конф. «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»*, Розлуч, 2016, с. 40-41.

16. Кузнецов В. Г., Саблін О. І., Губський П. В., Колыхаев Е. Г. «Модели элементов системы электротранспорта в задачах оптимизации режимов», на *Міжнар. науково-практ. конф. «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»*, Розлуч, 2016, с. 41-42.

17. Фесик М. О., Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Губський П. В., «Сучасна методологія керування потужністю тягової мережі постійного струму для швидкісного руху», на *Міжнар. науково-практ. конф. «Безпека та електромагнітна сумісність на залізничному транспорті»*, Розлуч, 2016, с. 81-82.

18. Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Кордін О. П., Косарев Є. М., Губський П. В., «Підвищення енергетичної ефективності керування режимом напруги в

тяговій мережі постійного струму», на *I Міжнар. науково-практ. конф. «Енергооптимальні технології перевізного процесу»*, Моршин, 2016, с. 123.

19. Kuznetsov V. G., Sychenko V. G., Bialon A., Hubskeyi P., «Energy efficient distributed technology of power transmission to vehicles», на *II Міжнар. науково-практ. конф. «Енергооптимальні технології перевізного процесу»*, Дніпропетровськ, 2018, с. 22-24.

20. Hubskeyi Petro, «Reserves for improving the energy efficiency of traction power systems», на *VI Międzynarodowa Konferencja «Najnowsze Technologie W Transporcie Szynowym»*, Warszawa, 2017, p. 43.

21. Belozyorov V., Hubskeyi P. V., Pulin M. M., Sychenko V. G., Zaytsev V. G., Kuznetsov V. G., «The model for studying of the dynamic processes in DC traction lines», на *Міжнар. науково-практ. конф. «Енергооптимальні технології, логістика та безпека на транспорті»*, Львів, 2018, с. 17-19.

АНОТАЦІЯ

Губський П. В. Підвищення енергетичної ефективності системи тягового електропостачання постійного струму при швидкісному русі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних за спеціальністю 05.22.09 «Електротранспорт» (27 – Транспорт). – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2019.

Дисертація присвячена вирішенню актуального науково-прикладного завдання – підвищення енергетичної ефективності систем тягового електропостачання постійного струму шляхом розробки наукових принципів побудови систем розподіленого живлення, які максимально вписуються в існуючу інфраструктуру для забезпечення швидкісного руху поїздів, що має істотне значення для електричного транспорту.

У роботі на основі експериментальних досліджень режимів напруги та потужності в системі тягового електропостачання постійного струму встановлено, що класичні системи централізованого живлення не дозволяють повною мірою забезпечити необхідні умови для впровадження швидкісного руху на існуючих лініях.

Вперше розроблено концепцію побудови енергоефективних систем розподіленого живлення. Зокрема, запропоновано здійснювати перехід від системи централізованого живлення до розподіленої системи зі збереженням існуючої інфраструктури живлення тягової мережі: розташування тягових підстанцій на місці існуючих, а одноагрегатних підстанцій – на постах секціонування. При цьому набув подальшого розвитку метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання на базі функцій опору в частині розрахунку потужності тягових підстанцій, необхідної для забезпечення режиму сталого споживання потужності при русі електрорухомого складу із заданим рівнем втрат напруги. Встановлено доцільність застосування двох перетворювальних агрегатів загальною потужністю 10 МВт, а для одноагрегатної підстанції – 5 МВт.

Створено математичну модель зміни струму й напруги в тяговій мережі з використанням нелінійного рекурентного аналізу, що дозволяє оцінити якість процесів електроспоживання та області стійкої роботи системи тягового електропостачання. Структура моделі дозволяє виявити приховані складові процесу. Набув подальшого розвитку метод забезпечення стійкості роботи систем тягового електропостачання постійного струму в частині використання нелінійного регулятора напруги. Доведено, що регулятор з нелінійним законом управління має кращу робастність, а зона стабілізації напруги в тяговій мережі при застосуванні нелінійного регулятора в 3-4 рази ширша, порівняно з використанням лінійного регулятора.

Реалізація системи розподіленого живлення дозволяє щорічно економити на дослідній ділянці 2,879 млн грн за рахунок зменшення вартості втрат електричної енергії в системі електропостачання.

Ключові слова: режим напруги та потужності, система тягового електропостачання, постійний струм, розподілене живлення, втрати потужності, стійкість.

ABSTRACT

Hubsnyi P.V. Increasing of the DC traction power supply system efficiency at high-speed traffic. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of a candidate of technical sciences on the specialty 05.22.09 – electric transport (27 – transport). – Dniprovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2019.

The thesis is devoted to the solving of the actual scientific and applied task of increasing the energy efficiency of DC power traction systems by developing scientific principles for the construction of distributed power systems that fit into the existing infrastructure to provide high-speed traffic, which is essential for electric transport.

In work on the basis of experimental research of voltage and power modes in the system of DC traction power supply was proved that classical systems of centralized power supply do not allow to provide the necessary conditions for the introduction of high-speed traffic on existing lines. Voltage values both on the buses of the traction load, and in the traction lines, have a significant range of oscillations. If there is a significant reserve of installed aggregate power at traction substations in Ukraine, there are no means of voltage modes regulation in the traction lines. Existing foreign and Ukrainian developments the energy efficiency increasing for DC traction power supply systems require significant capital investments and do not take into account the peculiarities of the organization of high-speed traffic. Therefore, it is necessary to develop energy-saving technology of distributed power with the maximum use of existing infrastructure, taking into account the features of the load of high-speed trains.

For the first time were developed the scientific principles of energy-efficient systems of distributed traction. Firstly, it was proposed to make a shift from the centralized power supply system to the distributed one, with the preservation of the existing supply infrastructure of the traction network - the location of traction substations in place of existing, and one unit substations on the sectioning points. Secondly, was developed method of calculating of the instantaneous traction power supply schemes on the basis of the resistance functions by calculating of the

traction substation's power necessary to provide a mode of steady-state consumption during movement of the electric rolling stock with a given level of voltage losses. Also was proposed to use two rectifier units with a total capacity of 10 MW and 5 MW for one aggregate substation

Furthermore, was developed the mathematical model for simulation of the current and voltage in the traction network using nonlinear recurrent analysis, which allows to estimate the quality of the processes of electric power consumption and the area of sustainable operation of the traction power supply system. The structure of the model allows to identify the hidden components of the process. Also, was developed the method of ensuring the stability of the DC traction power supply system in the part of using a nonlinear voltage regulator. The author proved that regulator with nonlinear control laws has the best robustness and the area of voltage stability in the power network providing application of non-linear regulator is 3-4 times wider comparing with linear regulator.

Implementation of the distributed power system allows to save annually on the test area 2,879 million UAH by reducing the cost of electricity losses in the power supply system.

Keywords: voltage and power modes, traction power supply system, DC, distributed power, power losses, stability.

Губський Петро Вячеславович

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ
ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ПРИ
ШВИДКІСНОМУ РУСІ

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Надруковано згідно з оригіналом автора

Підписано до друку 31 травня 2019 р.

Формат 60x48 1/16. Ум. др. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0.
Тираж 100 пр. Зам. №

Центр оперативної поліграфії DnePRint

Свідоцтво суб'єкта видавничої діяльності АБ № 726370 від 20.03.2013

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:

вул. Пр. Гагаріна 8А, Дніпро, 49010