

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



БОСИЙ ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.331:621.31.03

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

- Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор
Сиченко Віктор Григорович,
завідувач кафедри інтелектуальних систем електропостачання
Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна
Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро
- Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор
Лежнюк Петро Дем'янович,
завідувач кафедри електричних станцій та систем
Вінницького національного технічного університету
Міністерства освіти і науки України, м. Вінниця;
- доктор технічних наук, професор
Гриб Олег Герасимович,
завідувач кафедри автоматизації енергосистем
Національного технічного університету «Харківський
політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України,
м. Харків;
- доктор технічних наук, професор
Стасюк Олександр Іонович,
проректор з наукової роботи Державного економіко-технологіч-
ного університету транспорту Міністерства освіти і науки
України, м. Київ.

Захист відбудеться «11» травня 2017 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна або на сайті університету <http://diit.edu.ua/> (Наука – Захисти у раді Д08.820.01)
Автореферат розісланий «10» квітня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Муха А. М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В енергетичному балансі України електрифіковані залізниці займають частку споживання електроенергії на рівні 4 %, а безпосередньо на електричну тягу витрачається 2,8-3,5 % від обсягів генерованої електроенергії. Інфраструктура залізничного транспорту на сьогодні включає близько 10 тис. км електрифікованих ліній, що становить 47 % загальної експлуатаційної довжини. Довжина електрифікованих залізниць постійно збільшується через меншу питому витрату енергії на електричну тягу (в 1,8-2,2 рази) порівняно з тепловозною та можливість диверсифікації виду первинних енергетичних ресурсів.

Експлуатація на залізницях України сучасного швидкісного електрорухомого складу виявила проблеми та обмеження, які є в інфраструктурі залізниць. У частині режимів електропостачання це стосується обмежень за величиною та сталою часу споживання тягової потужності. Окрім цього, поступове впровадження інтелектуально-керованих джерел альтернативної енергетики, у тому числі й з приєднанням до тягових мереж, з одного боку, викликає проблеми неузгодженості режимів їх роботи, а з іншого – відкриває нові можливості в пошуку оптимальних розподілів потоків потужностей при живленні систем електричної тяги.

Оскільки в системах електропостачання електрифікованих залізниць кінцевий споживач електроенергії є просторово-розподіленим та постійно змінюється в часі, ускладнюється застосування сучасних розробок на основі Smart Grid технологій через відсутність наукових засад визначення керуючої послідовності впливів на пристрої тягового електропостачання та методів узгодження взаємодії системи зовнішнього із системою тягового електропостачання, що забезпечать режим електропостачання з мінімізацією втрат електроенергії.

Базові праці в галузі енергозбереження та оптимізації режимів електроенергетичних систем належать науковим школам під керівництвом таких учених, як Arrilaga J., Веніков В. А., Vollen M., Wu J., Гриб О. Г., Денисюк С. П., Jenkins N., Ekanayake Ja., Жежеленко І. В., Yokoуama A., Кириленко О. В., Liyanage K., Лежнюк П. Д., McGranaghan M. F., Півняк Г. Г., Саєнко Ю. Л., Сегеда М. С., Сенько В. І., Сокол Є. І., Стогній Б. С., Шидловський А. К., Щерба А. А. та інших.

Значний внесок у розв'язання теоретичних і прикладних проблем підвищення енергоефективності, зокрема на залізничному транспорті, зробили такі науковці, як Андрієнко П. Д., Аржанніков Б. О., Бабаєв М. М., Бардушко В. Д., Браташ В. О., Герман Л. А., Гетьман Г. К., Гончаров Ю. П., Далека В. Х., Доманський В. Т., Закарюкін В. П., Костін М. О., Кузнецов В. Г., Мамошин Р. Р., Марикін А. М., Марквардт К. Г., Мірошніченко Р. І., Mizitis M., Мокін Б. І., Панасенко М. В., Почаєвець Е. С., Rojek A., Сінчук О. М., Скалозуб В. В., Стасюк О. І., Nafer G., Хворост М. В., Черемісін В. Т., Szelag A., Щербак Я. В. та інші.

Основна увага в роботах учених приділяється стратегічним та концептуальним напрямкам розвитку транспортної енергетики, але розв'язання проблеми енергоефективності режиму електропостачання електрифікованих залізниць з урахуванням здійснення керуючої послідовності впливів у режимі реального

часу та узгодження взаємодії системи зовнішнього і тягового електропостачання залишається невирішеною.

Невирішеність проблеми зумовлена використанням двох різних систем електричної тяги, відмінностями в поділі суб'єктів обслуговування залізничної інфраструктури та адміністративних одиниць, організаційними питаннями при закупівлі електроенергії з оптового ринку та нормуванням вимог до режимів напруги в системах тягового електропостачання, що, у цілому, ускладнює застосування відомих методів підвищення енергоефективності режимів електропостачання та вимагає використання окремих підходів із урахуванням технічних та організаційних особливостей.

Порівняно з прийнятним рівнем втрат електроенергії в європейських країнах, який складає 6-8 %, енергоефективність систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць України практично в 2 рази гірша, оскільки без урахування магістральних ліній втрати для залізниць змінного струму складають 5-8 %, для постійного – 14-17 % від споживання електроенергії на тягу поїздів. У загальноенергетичному балансі України втрати електроенергії при передачі та транспортування становлять близько 11 %.

Актуальність роботи також пов'язана з тим, що впровадження швидкісного руху і збільшення вагових норм поїздів зумовлює необхідність нарощування провізної здатності залізниць, яка, як правило, на ділянках постійного струму обмежується пристроями електропостачання. Крім цього, фактичний рівень втрат електроенергії на залізницях змінного струму у випадку неузгодженості режимів системи зовнішнього і тягового електропостачання може збільшуватись через додаткове завантаження пристроїв тягового електропостачання транзитними перетіканнями, що також в окремих випадках призводить до надлишкової закупівлі електроенергії.

Таким чином, тема дисертаційної роботи, що спрямована на вирішення проблеми забезпечення енергоефективних режимів електропостачання електрифікованих залізниць, є актуальною і потребує наукового вирішення.

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

1) Державна Програма енергонезалежності, ухвалена указом Президента України № 5/2015 Про стратегію сталого розвитку «Україна – 2020» від 12.01.2015 р., у частині впровадження 100 відсотків обов'язкового комерційного обліку споживання енергоресурсів;

2) Енергетична стратегія України на період до 2030 р., схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013, у частині
– розвитку електроенергетичної галузі;
– розширення пропускної спроможності залізничних коридорів.

3) Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, ухвалена Постановою Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р. (із змінами, внесеними згідно з Постановою № 970), у частині
– підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту на внутрішньому і зовнішньому ринках транспортних послуг;
– зменшення обсягу питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів;

4) Постанова Верховної Ради України «Про програму діяльності Кабінету Міністрів України» № 26-VIII від 11.12.2014 р. стосовно:

розділу 6 «Нова продовольча політика», а саме розвиток портової та залізничної інфраструктури для нарощування експорту (2015-2019 роки);

розділу 7 «Нова політика енергетичної незалежності», а саме інтеграція української енергосистеми в мережу європейських енергосистем ENTSO-E та підвищення енергоефективності за рахунок реалізації проектів з використанням альтернативних джерел енергії (Clean Energy).

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

– «Розробка систем енергопостачання об'єктів залізничного транспорту з використанням новітніх схемних і проектних рішень», № держреєстрації 0111U009393;

– «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії та дослідження балансу електричної енергії в умовах спотворення її якості на тягових підстанціях постійного струму», № держреєстрації 0113U007949;

– «Дослідження якості електроенергії нетягових споживачів, які живляться від ліній «два проводи – рейка», № держреєстрації 0115U003922;

– «Дослідження транзиту потужності тяговою мережею при відхиленнях режиму напруги тягової підстанції змінного струму», № держреєстрації 0115U003919;

– «Дослідження режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій постійного струму та в тяговій мережі в умовах гірського перевалу», № держреєстрації 0115U003921;

– «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту», № держреєстрації 0115U002311;

– «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії», № держреєстрації 0115U003918;

– «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем», № держреєстрації 0116U006982.

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

Мета роботи. Метою роботи є підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованого залізничного транспорту за рахунок створення керуючої послідовності впливів, яка забезпечує оптимальний перерозподіл потоків потужності в системах тягового електропостачання, а також шляхом узгодження режимів взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення таких завдань:

1. Виконати аналіз стану проблеми енергоефективності режимів електропостачання залізничного транспорту, дослідити механізми ефективної передачі та розподілу електроенергії.

2. Розвинути метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання для коректного визначення режиму напруги за наявності на електрорухомому складі систем стабілізації тягової потужності.

3. Розробити метод розрахунку систем тягового електропостачання на основі просторово-часового уявлення електричних величин, з урахуванням керованих елементів у системах електроживлення тяги поїздів.

4. На основі експериментальних даних системно проаналізувати режими роботи систем тягового електропостачання постійного та змінного струму та дослідити вплив спотворень якості електроенергії на енергетичні характеристики й точність систем обліку.

5. Розробити наукові основи інтелектуального управління режимом напруги в системі електропостачання тяги постійного струму за рахунок визначення керуючої послідовності впливів на пристрої підсилення тягових мереж.

6. Удосконалити методи узгодженої взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання.

7. Розробити алгоритми для застосування розроблених методів у програмному продукті для інтелектуалізації процесу електропостачання в системах електричної тяги.

Об'єкт досліджень – процес електропостачання в системах електричної тяги електрифікованих залізниць.

Предмет досліджень – енергоефективність режимів роботи системи тягового електропостачання.

Методи досліджень. У роботі використано: аналіз літературних та електронних джерел для визначення стану енергоефективності електропостачання електрифікованих залізниць; баланс потужностей та узагальнення закономірностей для розвитку методів розрахунку режимів систем тягового електропостачання; експериментальні вимірювання, спектральний, статистичний аналіз для порівняння енергоефективності систем тягового електропостачання; дослідження на фізичних моделях для визначення впливу режимів напруги на систему обліку та енергетичні характеристики випрямлячів; принципи розрахунків та оптимізації в просторово-часових координатах для визначення керуючої послідовності впливів на пункти підсилення тягової мережі постійного струму; основи теорії енергообмінних процесів для нелінійних кіл та принципи параметризації при узгодженні взаємодії систем зовнішнього і тягового електропостачання; техніко-економічний аналіз для обґрунтування засобів підвищення енергоефективності.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які отримані в дисертації, обґрунтовані та достовірні, оскільки експериментальні дослідження коректно поставлені та кваліфіковано виконані, розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує 5 %; дослідні результати одержано на основі

великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики; більшу частину експериментальних даних одержано різними незалежними методами.

Основні наукові положення

1. Для створення умов підвищення енергоефективності процесів електропостачання електрифікованих залізниць необхідно втрати потужності в тягових мережах розглядати як добуток просторово-розподілених адитивних функцій спаду напруги та струму в контактній мережі, що дозволяє застосувати принцип суперпозиції до формалізації цільової функції при оптимізації режимів електропостачання та в аналітичному вигляді описати дисипативний процес виникнення втрат електроенергії в системах тягового електропостачання.

2. Створення керуючої послідовності впливів на пункти підсилення всередині міжпідстанційної зони при мінімізації добутку двовимірних функцій спаду напруги і струму в контактній мережі та представлення закономірності зміни опору тягової мережі у вигляді неперервної функції дозволяє підвищити енергоефективність та оптимізувати режими електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму.

3. Ефективність функціонування електрифікованих залізниць доцільно підвищувати шляхом узгодження взаємодії системи зовнішнього і тягового електропостачання, яка для електротяги змінного струму досягається переведенням транзитних перетікань потужності між підстанціями в реактивні за рахунок направлення вирівнювального струму за бісектрисою кута між векторами однойменних напруг первинної мережі, а для електротяги постійного струму – врахуванням реального профілю навантаження при дискретному визначенні потужності компенсуючого пристрою в аргументах цільової функції.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше:

1) запропоновано функцію опору тягової мережі та отримано аналітичні вирази у вигляді квадратичних залежностей з урахуванням питомого опору тягової мережі та координат вузлів з'єднання контактних підвісок відносно довжини ділянки, які дозволяють застосувати формальний підхід та перейти від дискретного до неперервного розрахунку систем тягового електропостачання незалежно від схеми живлення та місцевих особливостей електрифікованих ділянок залізниць;

2) сформульовано задачу оптимального керування для процесу електропостачання тяги постійного струму за критерієм мінімуму втрат потужності в системі електропостачання з урахуванням наявності на ділянці керованих пунктів підсилення, що дозволило розробити нову систему підтримки стабільного рівня напруги на струмоприймачах електрорухомого складу;

3) запропоновано концепцію комплексного дослідження для тягових підстанцій електрифікованих залізниць, яка передбачає одночасне врахування часових залежностей основних показників якості електроенергії та додатково коефіцієнтів спотворення і фазових портретів струмів навантаження для окремих класів первинної напруги підстанцій, що дозволило порівняти енергоефективність систем

тягового електропостачання постійного і змінного струму з урахуванням спотворень якості електроенергії та вмісту неактивних складових повної потужності.

Дістали подальшого розвитку та удосконалені:

4) метод фіксованої вихідної потужності для аналізу режимів системи електричної тяги, який за допомогою аналітичного виразу враховує принцип споживання постійної потужності, що відрізняється можливістю прямого безітераційного розрахунку та дозволяє коректно визначати показники режиму системи електропостачання для нових типів електровозів з функцією стабілізації тягової потужності;

5) метод обчислення керуючої послідовності впливів з використанням штучних нейронних мереж, в основу якого покладено тришарову структуру перцептронну з кількістю вхідних нейронів, що дорівнює кількості точок вимірювання напруги в контактній мережі, одним прихованим шаром та з кількістю вихідних нейронів, що визначається кількістю керованих пунктів підсилення на ділянці, який дозволяє використання розроблених методів визначення керуючої послідовності впливів у системах реального часу за неповної інформації на підставі лише дискретного розподілу спаду напруги в контактній мережі;

б) методи узгодженої взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання, які вплив параметрів поздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності на рівень транзитних перетікань потужності в системах електричної тяги змінного струму описують системою рівнянь в параметричному вигляді, що дозволяє залежно від кута зсуву фаз векторів напруги суміжних тягових підстанцій зменшити активні транзитні перетікання потужності шляхом їх переведення у реактивну площину;

7) метод визначення потужності компенсуючих пристроїв для сторони змінної напруги тягових підстанції постійного струму, яка враховує фактичний профіль споживання електроенергії, обсяги недокомпенсованої і перекомпенсованої реактивної електроенергії та, за умови застосування статичних пристроїв компенсації, дозволяє знизити витрати, пов'язані з перетіканнями реактивної електроенергії.

Практичне значення одержаних результатів.

Отримані в дисертації результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили:

1) використати у практиці проектування електричних мереж систем електропостачання залізничного транспорту удосконалений метод розрахунку систем тягового електропостачання з представленням величин у просторово-часових координатах та визначенням інтегральних характеристик і автоматизованим врахуванням впливаючих факторів;

2) запропонувати систему стабілізації напруги на струмоприймачах електро рухомого складу постійного струму, яка залежно від поїзної ситуації дозволяє зменшити втрати електроенергії в контактній мережі електрифікованих ділянок з 14-17 % до 7-8,5 % від споживання електроенергії на тягу, з одночасною можливістю технічного обліку втрат електричної енергії в тяговій мережі;

3) визначити параметри пристроїв поздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності для мінімізації транзитних перетікань електричної енергії з 4 МВт до 100-160 кВт між тяговими підстанціями змінного струму, які працюють в умовах відхилення кута зсуву фаз до 10 електричних градусів між однофазними напругами в системі зовнішнього електропостачання;

4) визначити потужності компенсуючих пристроїв для сторони змінної напруги тягових підстанцій постійного струму, які в умовах нерівномірних профілів добового навантаження дозволяють забезпечити максимальне зниження плати за перетікання реактивної електроенергії за умови її нарахування суб'єктам господарювання.

Дослідний зразок розробленого пристрою вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних придатний до застосування в реальних умовах на тягових підстанціях або електрорухомому складі. Використання пристроїв у вигляді розподіленої системи вимірювань дозволяє, окрім моніторингу режиму напруги в реальному часі, визначити поточні втрати електроенергії в тяговій мережі.

Створений програмний продукт для розрахунку режимних показників систем тягового електропостачання дає можливість на стадіях передпроектних досліджень визначати необхідні характеристики для ділянок, що підлягають електрифікації, в умовах неповної інформації, а для експлуатації – оцінювати технічні обмеження та аналізувати складові втрат у пристроях електропостачання.

Розроблені методики та підходи підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць прийнято до використання службами електропостачання регіональних філій «Одеська залізниця», «Південна залізниця» та Департаментом електрифікації та електропостачання ПАТ «Укрзалізниця», а також ДП «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту України «Укрзалізничпроект» та ТОВ «Деметра Л».

Результати роботи у вигляді фізичних моделей випрямляча тягової підстанції постійного струму, пристрою плавної компенсації реактивної потужності, пристрою вимірювання напруги та комп'ютерної програми впроваджені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Робота у вигляді проекту отримала фінансування на підставі конкурсного відбору науково-технічних розробок молодих учених Міністерства освіти і науки України у 2016 р., чим також підтверджується її практична значимість.

Особистий внесок здобувача. Постановка мети та розробка завдань дослідження виконані спільно з науковим консультантом. Наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, виконані в дисертаційній роботі, отримано дисертантом самостійно. У роботах, які написані в співавторстві, автору належать: [2] – концепція та схемна реалізація системи моніторингу напруги в тяговій мережі; [4] – статистичний аналіз показників якості електроенергії, розрахунки складових повної потужності для системи постійного та змінного

струму; [5] – методологія виконання розрахунків, виведення формул та їх узагальнення до різних схем живлення; [6] – розділи монографії з комплексного аналізу якості електроенергії в системі електричної тяги змінного струму, обліку електроенергії у несинусоїдних режимах тягових підстанцій, розробки технічних засобів підвищення якості електричної енергії в системах змінного струму; [7] – розробка схем підключення засобів вимірювальної техніки для дослідження електромагнітних процесів; [8] – виведення теоретичних співвідношень функцій втрат потужності для різних схем живлення; [9] – розробка імітаційної моделі та виконання варіантних розрахунків для різних графіків руху поїздів; [10] – теоретичні дослідження та отримання квадратичних функцій струморозподілу; [11] – розробка алгоритму пошуку мінімуму цільової функції з використанням імітаційної моделі системи тягового електропостачання; [14] – розробка схеми проведення натурних досліджень, узагальнення результатів спектрального аналізу осцилограм випрямленої напруги; [15] – теоретичні викладки та узагальнення отриманих співвідношень розрахунку струму підсилюючого пункту тягової мережі; [16] – постановка експериментальних вимірювань похибок лічильників електроенергії, аналіз та узагальнення результатів; [23] – формалізація аналітичних виразів для розрахунку режиму напруги; [24] – розробка схем проведення вимірювань та вимірювального пристрою, обробка результатів вимірювання; [27] – реалізація алгоритмів розрахунку втрат потужності з можливістю коригування графіку руху поїздів; [29] – принцип генерації додаткової потужності підсилюючим пунктом на основі розподіленої системи синхронних вимірювань напруги в контактній мережі; [30] – розробка концепції побудови програмного продукту, реалізація алгоритмів багатопотокових обчислень і основних класів системи моделювання; [31] – аналіз особливостей функціонування оптового ринку електроенергії стосовно електропостачання електрифікованих залізниць; [33] – багатоваріантні обчислення режимів виконання графіку руху поїздів, аналіз зниження втрат потужності в тяговій мережі; [34] – узагальнення способів коригування графіку руху поїздів для зменшення експлуатаційних витрат; [35] – отримання розрахункових формул для різних варіантів підсилення тягової мережі постійного струму; [37] – формалізація цільової функції та вибір методу оптимізації; [38] – аналіз результатів вимірювання режиму напруги; [40] – розрахункові формули з визначення функції опору тягової мережі на двоколіїних ділянках; [42] – визначення та ранжування факторів, що впливають на втрати електроенергії в контактній мережі; [44] – розробка схемних рішень фізичного макету; [45] – синтез перетворювача сигналів для розширення можливостей вимірювального пристрою; [47] – формулювання критеріїв та обмежень для роботи системи стабілізації; [48] – аналіз результатів проведених вимірювань; [49] – аналіз причин та наслідків від виникнення вирівнювальних струмів у тяговій мережі; [50] – розрахунки варіантів зниження транзиту потужності тяговою мережею; [51] – розробка схемних рішень для одночасного вимірювання в колі постійного і змінного струму.

Роботи [1, 3, 12, 13, 17-22, 25, 26, 28, 32, 36, 39, 41, 43, 46] написані самостійно, без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і одержали схвалення на таких вітчизняних та міжнародних конференціях: VI Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2012» (Місхор, 2012 р.), IV Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець, 2013 р.), II Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками ОКЕУ-2013 (Вінниця, 2013), 11th International Conference «Modern Electric Traction» MET'2013 (Warsaw, 2013), International Conference «Reliability of railway and possibilities to increase it» (Warsaw, 2013), 74 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2014), V Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець, 2014), VII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2014» (Одеса, 2014), International Conference «Najnowsze technologie w transporcie szynowym» (Warsaw, 2014), VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець, 2015), VIII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2015» (Одеса, 2015), Четверта міжнародна конференція «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'15» (Київ, 2015), III Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками ОКЕУ-2015» (Вінниця, 2015), Міжнародна науково-практична конференція «Силова електроніка та енергоефективність» (Харків, 2015), 4th International Conference «Advanced rail technologies» (Warsaw, 2015), VII Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми безпеки на транспорті» (Гомель, 2015).

У повному обсязі дисертація доповідалась на міжкафедральному науковому семінарі у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та науковому семінарі в Instytutu Kolejnictwa (Інститут залізничного транспорту, Польща).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано у 25 основних працях, з них: 2 – статті у журналах, що індексуються Scopus [1, 2]; 3 – статті в закордонних виданнях [3-5]; 1 – монографія, 19 – статті у фахових виданнях, і 26 додаткових, з них 2 – патенти на корисну модель, 2 – свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерна програма), 6 – додаткові статті, 16 – тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Повний обсяг дисертації становить 396 сторінок, серед них 225 рисунків за текстом, з них 75 рисунків розташовано на 30 окремих сторінках, 24 таблиці за текстом, список використаних джерел з 307 найменувань – на 24 сторінках, додатки – на 67 сторінках. Основний текст роботи викладено на 275 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У *першому розділі* проаналізовано стан проблеми енергоефективності режимів електропостачання залізничного транспорту.

Головну роль у функціонуванні транспортного сектору держави відіграють електрифіковані залізниці, ефективність електропостачання яких з позиції втрат електроенергії майже у два рази гірша, ніж у розвинених європейських країнах. Незважаючи на зниження загальних обсягів залізничних перевезень та, як наслідок, коливання за роками обсягів споживання електроенергії, вартість спожитих обсягів постійно зростає. Питома вага електричної тяги в енерговитратах на залізничному транспорті складає близько 80 %, а у собівартості залізничних перевезень енергетична складова сьогодні оцінюється на рівні 21...25 % і має тенденцію до збільшення.

Однією з причин зростання вартості спожитої електроенергії на загальному фоні зниження обсягів перевезень є постійне підвищення тарифів на електроенергію. У такій ситуації умовами головною умовою підвищення енергоефективності є максимальне зниження втрат у системах електропостачання, які також значно впливають на сукупну вартість електроенергії.

Використання двох різних систем електрифікації постійного 3 кВ та змінного 25 кВ струму, розподіл суб'єктів обслуговування залізничної інфраструктури, який не збігається з поділом адміністративних одиниць, закупівля електроенергії залізницями з оптового ринку та нормовані вимоги до режимів напруги в системах тягового електропостачання в цілому ускладнюють підвищення енергоефективності режимів електропостачання та вимагають застосування окремих підходів із урахуванням технічних та організаційних особливостей.

Так, у системі постійного струму проблема порушення режиму напруги полягає, насамперед, в обмеженні провідної і пропускної спроможності та, як наслідок, у невиправданих втратах електроенергії в тягових мережах. Для системи змінного струму, окрім вказаних обмежень, відхилення в режимах напруги суміжних тягових підстанцій, що паралельно живлять ділянку залізниці, можуть викликати виникнення транзитних перетікань потужності, які створюють додаткове завантаження пристроїв тягового електропостачання та призводять до надлишкової закупівлі електроенергії.

Фактичний рівень втрат електроенергії в системах тягового електропостачання (без урахування втрат у магістральних лініях), який за умови відсутності автоматизованої системи обліку електроенергії на тягу поїздів визначається експериментально окремо кожною залізницею, для залізниць змінного струму складає 5-8 %, для постійного – 14-17 %, а в окремих випадках – до 24 % від загальних витрат електроенергії на тягу. У загальноенергетичному балансі України втрати електроенергії при її передачі та транспортуванні оцінюються на рівні 11 %, а

прийнятним рівнем в європейських країнах вважається 6-8 %. З цього випливає, що системи електричної тяги мають низьку ефективність і потребують підвищення енергоефективності та зниження втрат електроенергії.

Впровадження швидкісного руху, збільшення вагових норм поїздів зумовлює необхідність нарощування провізної здатності залізниць, яку на діючих ділянках, що електрифіковані постійним струмом, обмежують пристрої електропостачання.

З урахуванням того що обмежуючим фактором для залізниць постійного струму є відносно низький рівень напруги в контактній мережі, необхідна реконструкція системи електричної тяги постійного струму, спрямована на підвищення пропускної і провізної здатності з максимальною реалізацією переваг цієї системи та з мінімальними додатковими капітальними видатками, які, у першу чергу, пов'язані із заміною значної кількості електрорухомого складу постійного струму.

З відомих розробок і досліджень стосовно усунення обмежень системи електричної тяги постійного струму найбільшої уваги заслуговують керовані системи тягового електропостачання з перерозподілом потужності. У таких системах основу складає перспективне обладнання тягових підстанцій або пунктів підсилення на основі вольтододаткових пристроїв з безконтактним автоматичним регулюванням напруги. Однак у цих дослідженнях пристрої підсилення розглядаються як окремі елементи систем електропостачання без можливості управління кожним з них у режимі реального часу в єдиній системі інтелектуального електропостачання. Тому і ускладнено підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць безпосереднім застосуванням Smart Grid технологій. Таким чином, розробка керуючої послідовності впливів на пункти підсилення тягової мережі постійного струму, яка складає основу інтелектуальної системи електропостачання електрифікованих залізниць, забезпечить підвищення енергоефективності у вигляді необхідного режиму напруги при мінімізації втрат електричної енергії, а методи узгодженої взаємодії систем зовнішнього і тягового електропостачання забезпечать додаткове підвищення ефективності функціонування електрифікованих залізниць.

У *другому розділі* викладено підходи до розвитку методів розрахунку параметрів режиму електропостачання з урахуванням наявності систем стабілізації тягової потужності на електрорухомому складі та керованих пунктів підсилення в системі тягового електропостачання.

Врахування принципу споживання постійної потужності сучасними видами електрорухомого складу виконується аналітичним виразом, який отримано в дисертації шляхом дослідження закономірності зміни розподілу потоків потужності на основі балансу потужності на кожному інтервалі часу для різних схем живлення тягової мережі.

Так, для двосторонньої схеми живлення, розрахункова схема якої наведена на рис. 1, рівняння балансу враховує потужності першої та другої підстанцій P_1, P_2 та втрати в тяговій мережі $\Delta P_1, \Delta P_2$, які обов'язково виникатимуть при передачі основної потужності P . Таким чином

$$P = P_1 - \Delta P_1 + P_2 - \Delta P_2 . \quad (1)$$

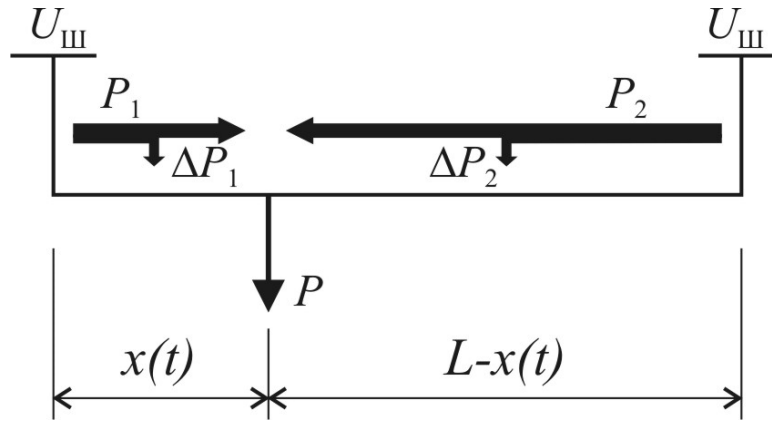


Рисунок 1 – Розрахункова схема для двосторонньої схеми живлення

Виразивши складові рівняння (1) через величину напруги і струму електро-воза, струми фідерів тягових підстанцій та використовуючи формули струмороз-поділу з подальшим групуванням невідомих відносно струму електровоза, отри-мане рівняння

$$I(x) = \frac{U_{\text{III}} - \sqrt{U_{\text{III}}^2 - 4f(x)P(x)}}{2f(x)}, \quad (2)$$

де U_{III} – напруга на шинах тягової підстанції в режимі холостого ходу, В;

$f(x)$ – функція опору тягової мережі, Ом;

$P(x)$ – потужність, що реалізується електровозом у певний момент часу, Вт.

Аналізуючи теоретичні співвідношення для інших схем живлення, встано-влено, що визначення струму електровоза для випадку споживання постійної по-тужності зводиться до рівняння (2), у якому при зміні схеми живлення зміниться лише вираз $f(x)$. Цей вираз запропоновано визначити як функцію опору тягової мережі, яка змінюється залежно від схеми живлення тягової мережі. Для консоль-ної схеми функція має вигляд

$$f(x) = r_0 \cdot x, \quad (3)$$

де r_0 – питомий опір тягової мережі, Ом/км;

x – координата розташування електровоза, км.

Для двосторонньої схеми живлення

$$f(x) = r_0 \cdot \left(x - \frac{x^2}{L} \right), \quad (4)$$

де L – відстань між тяговими підстанціями, км.

Для вузлової схеми живлення

$$f(x) = r_0 \cdot \begin{cases} x - \left(\frac{L + L_C}{2LL_C} \right) x^2, & 0 \leq x \leq L_C; \\ \frac{L(x - L_C/2)}{L - L_C} - \frac{(L - L_C/2)x^2}{L(L - L_C)}, & L_C \leq x \leq L, \end{cases} \quad (5)$$

де L_C – координата розташування поста секціонування на ділянці, км;

Для паралельної схеми живлення

$$f(x) = r_0 \cdot \begin{cases} x - \frac{x^2}{2L} - \frac{x^2}{2L_{C1}}, 0 \leq x \leq L_{C1}; \\ -\frac{x^2 - 2L_Cx + L_CL_{C1}}{2L_C - 2L_{C1}} - \frac{L_Cx^2 - L_{C1}x^2}{2L(L_C - L_{C1})}, L_{C1} \leq x \leq L_C; \\ \frac{x^2 - 2L_{C2}x + L_CL_{C2}}{2L_C - 2L_{C2}} - \frac{L_Cx^2 - L_{C2}x^2}{2L(L_C - L_{C2})}, L_C \leq x \leq L_{C2}; \\ -\frac{(L-x) \cdot (LL_{C2} - 2Lx + L_{C2}x)}{2L(L - L_{C2})}, L_{C2} \leq x \leq L, \end{cases} \quad (6)$$

де L_{C1} , L_{C2} – координати розташування на ділянці пунктів паралельного з'єднання контактних підвісок, км.

Перевірка балансу електричної енергії для типових вихідних даних (довжина ділянки – 20 км, питомий опір тягової мережі 0,05 Ом/км, середня швидкість руху – 60 км/год) і визначення струму електровоза за формулою (2) при $P(x) = \text{const}$ показали, що для кожного моменту часу за розрахованими напругою і струмом споживана потужність електровоза дійсно виходить постійною, а змінюються лише втрати залежно від схеми живлення (рис. 2). При цьому постійність потужності забезпечується збільшенням споживаного електровозом струму з урахуванням фактичного зниження напруги на струмоприймачеві.

Оцінка точності удосконаленого методу розрахунку виконана шляхом порівняння випадків: у першому – тягове навантаження розглядається як джерело постійної потужності; у другому – струм електровоза визначається відношенням потужності до номінальної напруги в контактній мережі (3,0 кВ). У діапазоні потужності від 0 до 10 МВт порівнювались мінімальні значення напруги, які виникають в різних точках залежно від схем живлення. Результуюча похибка (рис. 3) отримана відношенням різниці розрахованих напруг до напруги за першим випадком. Результати показали, що похибка збільшується зі збільшенням потужності, яка реалізується електрорухомим складом. У діапазоні потужностей до 8 МВт похибка визначення напруги не перевищує 5 %, а для більших значень потужності і двосторонньої схеми живлення – перевищує 5 %.

Точність визначення напруги на лімітуючій блок-ділянці має велике значення стосовно визначення пропускної спроможності та врахуванні обмежень, що вносяться пристроями тягового електропостачання. Так, визначене мінімальне значення напруги на рівні 2800 В за класичним методом у випадку споживання постійної потужності, наприклад, 8 МВт матиме фактичне значення 2660 В, що не відповідатиме діючим вимогам.

Узагальнити методи розрахунку параметрів режиму систем тягового електропостачання запропоновано за допомогою просторово-часового уявлення. Прос-

торово-часова модель системи тягового електропостачання ґрунтується на аналітичному описі основних електричних процесів функціями двох змінних, взаємозв'язок між якими визначається графіком руху поїздів $x_T(n,t)$ (рис. 4), що, у свою чергу, визначає графікову координату кожного окремого поїзда з номером n у будь-який момент часу t . Використовуючи інші вихідні дані у вигляді профілю потужності електровоза, параметрів системи зовнішнього та тягового електропостачання, визначаються кусково-задані функції двох змінних, які являють собою залежності розподілу струмів та втрат напруги в контактній мережі в часі та просторі.

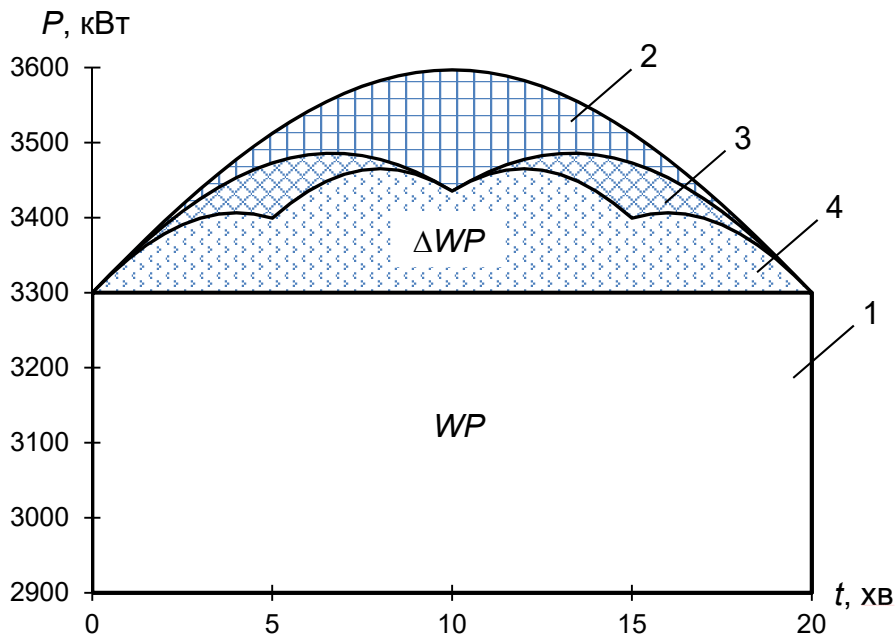


Рисунок 2 – Складові балансу електричної енергії при споживанні постійної потужності: 1 – споживання навантаженням; 2 – втрати для двосторонньої схеми живлення; 3 – втрати для вузлової схеми; 4 – втрати для паралельної схеми

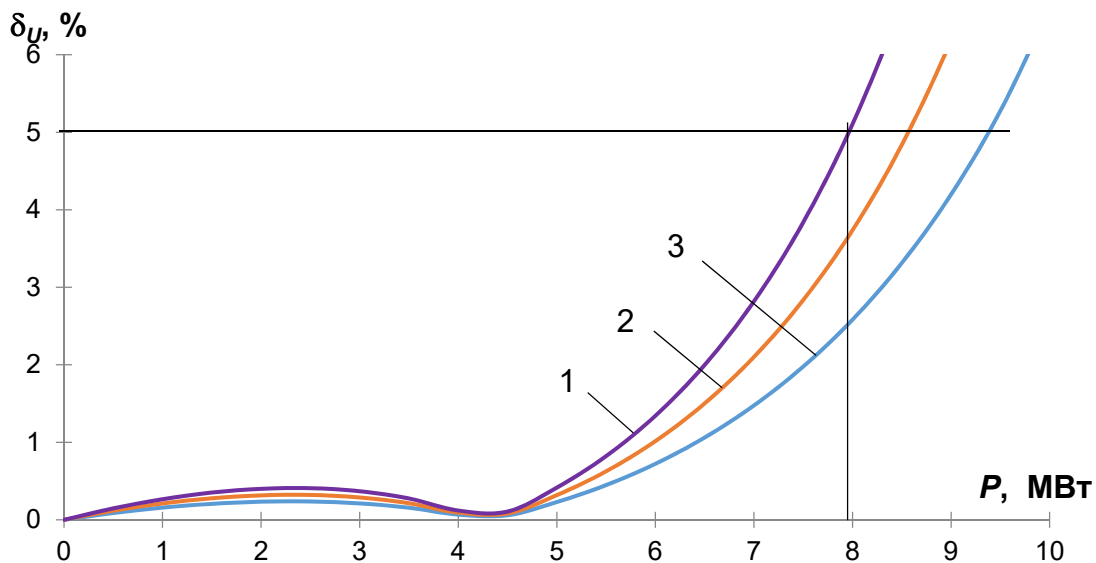


Рисунок 3 – Похибка розрахунку напруги для схем живлення:
1 – двостороння; 2 – вузлова; 3 – паралельна

Наприклад, для вузлової схеми живлення функції розподілу струму та спаду напруги в контактній мережі першої колії відповідно матимуть вигляд

$$i_{K1}(n,t,x) = \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} I_{\Phi 1}(n,t), 0 \leq x \leq x_{\Gamma}(n,t); \\ - \sum_{i=2,3,4} I_{\Phi i}(n,t), x_{\Gamma}(n,t) < x \leq l_C; \\ -I_{\Phi 3}(n,t), l_C < x \leq L; \end{array} \right. \Bigg|, 0 \leq x_{\Gamma}(n,t) \leq l_C; \\ \left. \begin{array}{l} I_{\Phi 1}(n,t), 0 \leq x \leq l_C; \\ \sum_{i=1,2,4} I_{\Phi i}(n,t), l_C < x \leq x_{\Gamma}(n,t); \\ -I_{\Phi 3}(n,t), x_{\Gamma}(n,t) < x \leq L; \end{array} \right. \Bigg|, l_C < x_{\Gamma}(n,t) \leq L; \\ \left. \begin{array}{l} I_{\Phi 1}(n,t), 0 \leq x \leq l_C; \\ -I_{\Phi 3}(n,t), l_C < x \leq L; \end{array} \right. \Bigg|, n = 2i, \end{cases} \quad (7)$$

де $I_{\Phi i}(n,t)$ – струм i -го фідера від поїзда з номером n у момент часу t , А;

$x_{\Gamma}(n,t)$ – графікова координата поїзда з номером n у момент часу t , км;

$$\Delta u_{K1}(n,t,x) = r_0 \cdot \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} i_{K1}(n,t,x) \cdot x, 0 \leq x \leq x_{\Gamma}(n,t); \\ \Delta u_{K1}(n,t,x_{\Gamma}(n,t)) + i_{K1}(n,t,x)(x - x_{\Gamma}(n,t)), x_{\Gamma}(n,t) < x \leq l_C; \\ \Delta u_{K1}(n,t,l_C) + i_{K1}(n,t,x)(x - l_C), l_C < x \leq L; \end{array} \right. \Bigg|, 0 \leq x_{\Gamma}(n,t) \leq l_C; \\ \left. \begin{array}{l} i_{K1}(n,t,x) \cdot x, 0 \leq x \leq l_C; \\ \Delta u_{K1}(n,t,l_C) + i_{K1}(n,t,x)(x - l_C), l_C < x \leq x_{\Gamma}(n,t); \\ \Delta u_{K1}(n,t,x_{\Gamma}(n,t)) + i_{K1}(n,t,x)(x - x_{\Gamma}(n,t)), x_{\Gamma}(n,t) < x \leq L; \end{array} \right. \Bigg|, l_C < x_{\Gamma}(n,t) \leq L; \\ \left. \begin{array}{l} i_{K1}(n,t,x) \cdot x, 0 \leq x \leq l_C; \\ \Delta u_{K1}(n,t,l_C) + i_{K1}(n,t,x)(x - l_C), l_C < x \leq L; \end{array} \right. \Bigg|, n = 2i. \end{cases} \quad (8)$$

Суперпозиція відносно кожного навантаження на ділянці адитивних функцій розподілу струмів та спаду напруги в контактній мережі виконується з урахуванням вирівнювальних струмів, тобто на прикладі першої колії матимемо

$$I_{K1}(t,x) = \sum_{i=1}^{n_1} i_{K1}(2i-1,t,x) + \sum_{i=1}^{n_2} i_{K1}(2i,t,x) + i_{\text{Вир}}(t); \quad (9)$$

$$\Delta U_{K1}(t,x) = \sum_{i=1}^{n_1} \Delta u_{K1}(2i-1,t,x) + \sum_{i=1}^{n_2} \Delta u_{K1}(2i,t,x) + r_0 x \cdot i_{\text{Вир}}(t). \quad (10)$$

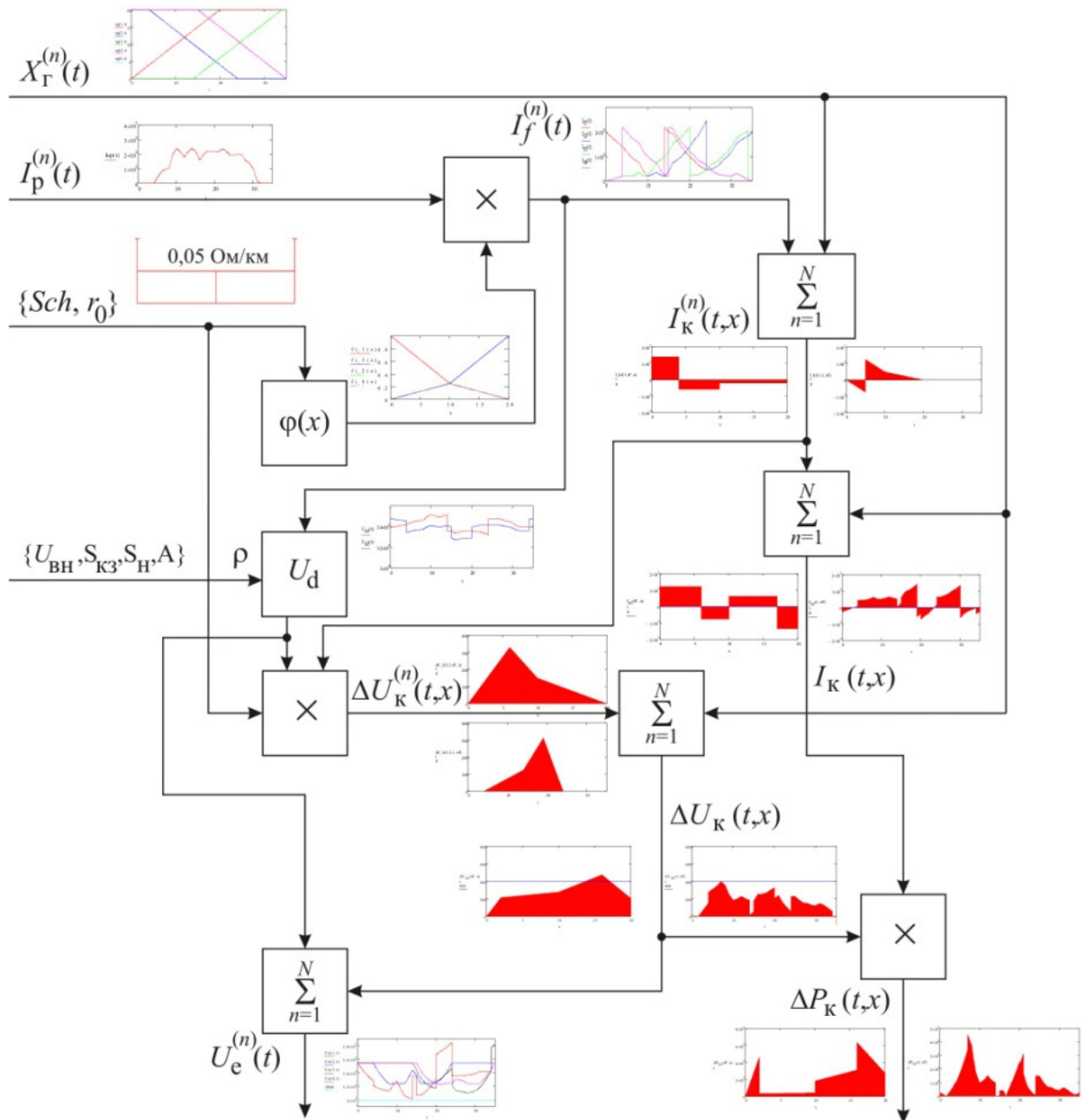


Рисунок 4 – Узагальнена структура просторово-часової моделі

Добуток за модулем просторово-часових функцій розподілу втрат напруги та струмів у контактній мережі визначає розподіл втрат потужності

$$\Delta P_K(t, x) = |I_{K1}(t, x) \cdot \Delta U_{K1}(t, x)| + |I_{K2}(t, x) \cdot \Delta U_{K2}(t, x)|. \quad (11)$$

Інтегрування функції розподілу втрат потужності за координатою простору визначає миттєві значення втрат потужностей у системі електропостачання, за координатою часу – розподіл втрат електроенергії уздовж розрахункової ділянки. Подвійне інтегрування функції розподілу втрат потужності визначає втрати електроенергії на розрахунковій ділянці за період розрахунку.

$$\Delta P_K(t) = \frac{1}{L} \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx; \quad \Delta P_K(x) = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P_K(t, x) dt; \quad (12)$$

$$\Delta W = \frac{1}{L \cdot T} \int_0^T \int_0^L \Delta P_K(t, x) dx dt. \quad (13)$$

Величина напруги на струмоприймачі електровоза з урахуванням взаємного впливу кожного навантаження на попутній та, залежно від схеми живлення, на суміжній коліях визначається

$$U_j(x) = U_{III} - I_j(x) \cdot f(x) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n_1} \Delta U'_k(x, x_k) - \sum_{k=n_1}^{n_1+n_2} \Delta U''_k(x, x_k), \quad (14)$$

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 ж на суміжній колії, В.

Отримані результати придатні для подальшого впровадження в сучасні засоби імітаційного моделювання, оскільки мають можливість аналітичної формалізації, що, у свою чергу, позначається на об'ємах та швидкості розрахунку.

Удосконалені методи узагальнені до виконання електричних розрахунків систем тягового електропостачання в просторово-часових координатах, що дає можливість визначати характеристики розподілених систем тягового електропостачання та враховувати наявність інтелектуально-керованих елементів у системах тягового електропостачання шляхом їх суперпозиції до вихідних даних як навантажень.

У *третьому розділі* наведено результати експериментальних досліджень режимів споживання електричної енергії в системах тягового електропостачання постійного та змінного струму. Дослідження проводились на 11 тягових підстанціях постійного струму, 6 тягових підстанціях змінного струму та 6 електровозах при дослідних поїздках на електрифікованих ділянках залізниць (табл. 1-4).

Таблиця 1 – Об'єкти досліджень «тягові підстанції»

№	Назва	Первинна напруга	№	Назва	Первинна напруга
Постійний струм			Змінний струм		
1	ЕЧЕ-Ілларіонове	35 кВ	I	ЕЧЕ-Знам'янка	154 кВ
2	ЕЧЕ-Елеваторна	220 кВ	II	ЕЧЕ-Олександрія	154 кВ
3	ЕЧЕ-Поштова	110 кВ	III	ЕЧЕ-Шевченка	154/110 кВ
4	ЕЧЕ-Сімферополь	35 кВ	IV	ЕЧЕ-Чубівка	110 кВ
5	ЕЧЕ-Федорівка	35 кВ	V	ЕЧЕ-Полтава	110 кВ
6	ЕЧЕ-Горяїнове	6 кВ	VI	ЕЧЕ-Курилівка	110 кВ
7	ЕЧЕ-Варварівка	35 кВ			
8	ЕЧЕ-Залізнякове	35 кВ			
9	ЕЧЕ-Самойлівка	110 кВ			
10	ЕЧЕ-Красноармійськ	35 кВ			
11	ЕЧЕ-Основа	110 кВ			

Таблиця 2 – Об’єкти досліджень «електрифіковані ділянки залізниць»

Назва	Електровоз	Назва	Електровоз
Постійний струм		Змінний струм	
Запоріжжя – Синельникове	ВЛ-8	Користівка – Кременчук	ВЛ-80Т
Клепарів – Воловець	ВЛ-11М	Котовськ – Одеса	2ЕС5К
Дніпро – П’ятихатки	ВЛ-8	Знам’янка – П’ятихатки	ВЛ-80Т

Таблиця 3 – Показники якості електроенергії в системах електричної тяги

Показник	Приєднання	Нормоване значення	Постійний струм	Змінний струм
K_U	35 кВ	4 %	2,35 % (+)	5,84 % (-)
K_I		–	10 %	9,4 %
K_{2U}		2 %	0,82 % (+)	2,95 % (-)
ΔU		$\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$	6,5 % (-)	5,4 (-)
ΔU	3,3 кВ (=) 27,5 кВ (~)	$\pm 5 \%$, $\pm 10 \%$	11% (-)	6,93% (-)

Результати системного аналізу показників якості електроенергії показали, що в цілому система електричної тяги змінного струму має гірші показники відносно до системи постійного струму.

Найбільш важливим показником, який унеможливорює конкуренцію за рівнем втрат електроенергії системи постійного струму із системою змінного є рівень напруги. Стосовно системи змінного струму, фактором, що знижує техніко-економічні показники роботи, є наявність режимних перетікань потужності, які викликані кутом зсуву фаз між однойменними векторами живильної напруги.

Експериментальні дослідження також показали, що система змінного струму не повною мірою відповідає існуючим критеріям енергоефективності, оскільки допускає значні спотворення якості електроенергії, що постачається стороннім споживачам, і характеризується значним вмістом неактивних складових повної потужності на відміну від системи постійного струму.

Таблиця 4 – Складові та коефіцієнти потужності для тягових підстанцій

Показники		Змінний струм		Постійний струм	
		п/ст. Ш	п/ст. П	п/ст. В (6-п.)	п/ст. С (12-п.)
Складові повної потужності, %: за Фрізе	P^2	48,6	64,1	90,4	96,7
	Q^2_F	51,4	35,9	9,6	3,3
за Будеану	P^2	48,6	64,1	90,4	96,4
	Q^2_B	43,1	28,9	5,2	1,4
	D^2	8,3	7,0	4,4	2,3
Коефіцієнти	$\cos \varphi_1$	0,721	0,824	0,972	0,993
	$\operatorname{tg} \varphi_1$	0,961	0,689	0,242	0,121
	λ	0,697	0,800	0,951	0,984

Четвертий розділ присвячено дослідженню особливостей впливу режимів напруги на енергетичні характеристики на фізичних та імітаційних моделях, чим перевірявся можливий вплив якості електроенергії на точність системи обліку.

Для встановлення взаємозв'язку між режимами роботи системи зовнішнього електропостачання та тяговою мережею постійного струму використано явище зміни частотного спектру випрямленої напруги при виникненні несиметричної вхідної напруги випрямляча.

У результаті виконаних стендових досліджень отримано енергетичні характеристики при несиметрії напруги живильної мережі, які визначаються зниженням коефіцієнту потужності (табл. 5).

Таблиця 5 – Залежність коефіцієнта потужності від співвідношення гармонік

$K_{2U}, \%$	$K_{СВГ}$	λ_A	λ_B	λ_C	λ_{AC}	λ_{DC}
0	0	0,850	0,843	0,845	0,840	0,9973
2,0	0,4	0,851	0,841	0,845	0,843	0,9973
4,0	0,7	0,853	0,838	0,837	0,840	0,9972
5,0	0,8	0,855	0,834	0,835	0,840	0,9971
10,0	1,6	0,867	0,822	0,830	0,841	0,9970
15,0	2,6	0,881	0,804	0,820	0,840	0,9970

Примітки: $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ – коефіцієнти потужності у фазах кола змінного струму; λ_{AC} – коефіцієнт потужності кола змінного струму; λ_{DC} – коефіцієнт потужності кола випрямленого струму; K_{2U} – коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю; $K_{СВГ}$ – коефіцієнт співвідношення вищих гармонік.

На рис. 5 наведено отримані залежності коефіцієнта потужності λ від коефіцієнта співвідношення вищих гармонік $K_{СВГ}$ для кожної фази кола змінного струму та окремо для кола постійного струму. Як видно з графіків, несиметрія напруги досить незначно впливає на результуючі коефіцієнти потужності кіл змінного та постійного струму. Крім того, встановлено закономірності перерозподілу потужностей у фазах змінного струму, які призводять до збільшення коефіцієнта потужності у фазі із заниженою напругою та відповідного зменшення у двох інших.

Використаний метод визначення несиметрії напруги із застосуванням коефіцієнта співвідношення вищих гармонік дістав подальшого розвитку та дозволяє визначити ступінь несиметрії та енергетичні характеристики електричного кола за відомими значеннями гармонік в колі постійного струму.

Показано, що електронні прилади обліку електричної енергії можуть мати декілька алгоритмів визначення реактивної потужності, які базуються на відомих теоретичних підходах до визначення неактивних складових повної потужності. Отримані характеристики (рис. 6) показують, що при виборі типу комерційних приладів обліку для нелінійних навантажень, зокрема для тягових підста-

нцій постійного та змінного струму, необхідно звертати увагу на результати випробувань при зниженій якості електричної енергії, оскільки наявні режими, коли виникає похибка обліку реактивної електроенергії.

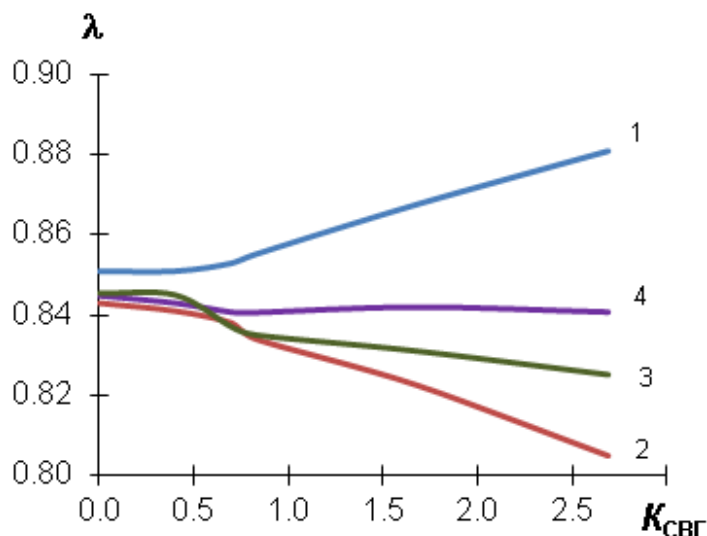


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта потужності від співвідношення гармонік у колі змінного струму: 1 – фаза А, 2 – фаза В, 3 – фаза С, 4 – все коло

Таким чином, для електронних приладів обліку електроенергії в умовах, що відповідають реальному стану показників якості електроенергії тягових підстанцій постійного і змінного струму, при вимірюванні активної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням, а при вимірюванні реактивної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням лише для реактивної потужності першої гармоніки та при коефіцієнті спотворення форми струму не більше 25 %.

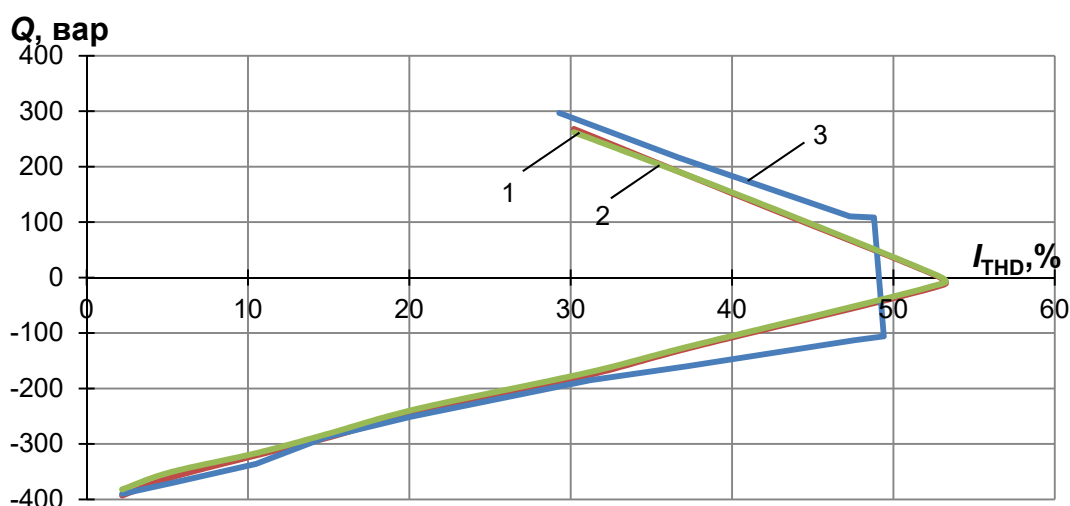


Рисунок 6 – Реактивні потужності залежно від коефіцієнта спотворення струму: 1 – основна гармоніка за лічильником; 2 – основна гармоніка за еталонним приладом; 3 – потужність Фрізе за еталонним приладом

У *п'ятому розділі* розвинуто наукові основи підвищення енергоефективності режимів електропостачання за допомогою визначення керуючої послідовності впливів на пункти підсилення всередині міжпідстанційної зони.

Формалізуючи поставлену задачу, маємо деяку міжпідстанційну зону, на якій може перебувати різна кількість навантажень I_1, I_2, \dots, I_n (рис. 7). З урахуванням можливості різного рівня напруги на шини суміжних тягових підстанцій необхідно визначити часові залежності струмів пунктів підсилення $I_{\text{пп}}$, які при зміні поїзної ситуації дозволять забезпечити на струмоприймачі кожного поїзда номінальний рівень напруги з мінімально можливим рівнем втрат потужності в системі тягового електропостачання.

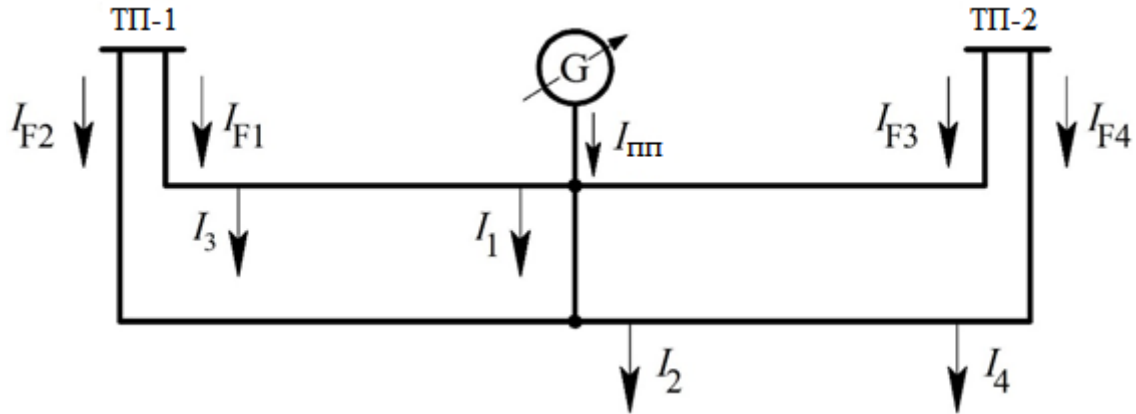


Рисунок 7 – Розрахункова схема міжпідстанційної зони з пунктом підсилення

Задача оптимального керування полягає в тому, що необхідно для прийнятої математичної моделі

$$\Delta W(\vec{I}) = \frac{1}{L \cdot T} \int_0^L \int_0^T \left[\sum_{i=1}^k \Delta U_{K_i}(\vec{I}, t, x) \cdot \sum_{i=1}^k I_{K_i}(\vec{I}, t, x) \right] dx dt, \quad (15)$$

визначити струми пунктів підсилення з метою мінімізації цільової функції $\Delta W(\vec{I}) \rightarrow \min$ при обмеженнях за напругою для кожного електрорухомого складу $U_{\min} \leq U_e \leq U_{\max}$ та за струмом кожного пункту підсилення $I_{\text{пп}} \leq I_{\max}$.

Виконані варіантні розрахунки показали, що при прямуванні навантаження міжпідстанційною зоною залежно від величини обмеження напруги втрати електроенергії знижуються в межах 38-61 % (рис. 8-11).

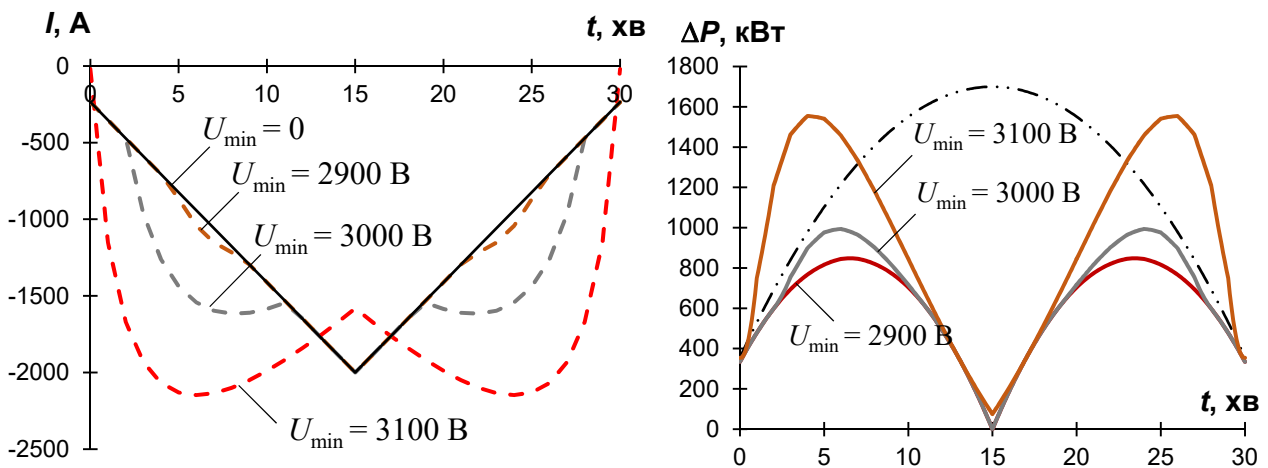


Рисунок 8 – Струми пунктів підсилення (зліва) та втрати потужності (справа) в режимі обмеження мінімальної напруги

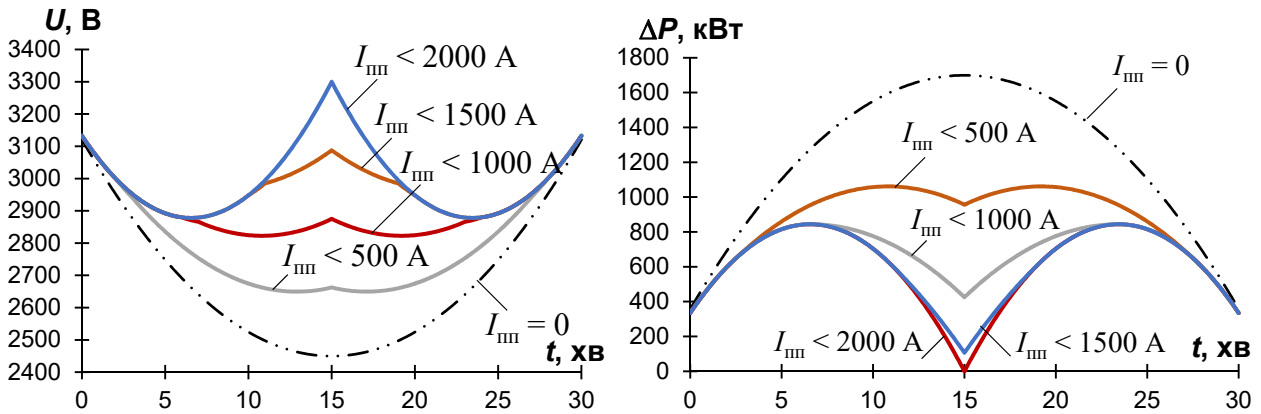


Рисунок 9 – Напруги на струмоприймачі (зліва) та втрати потужності (справа) в режимі обмеження струмів пунктів підсилення

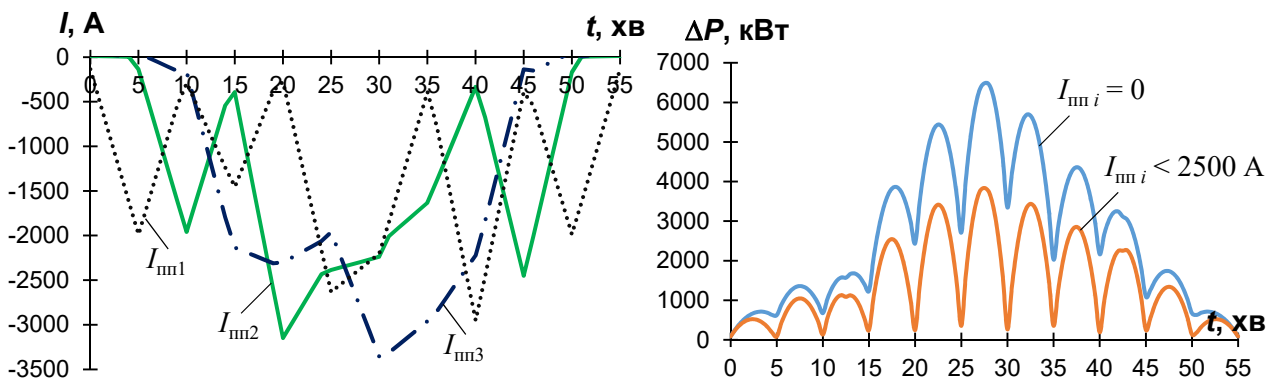


Рисунок 10 – Струми трьох пунктів підсилення (зліва) та втрати потужності (справа) для ділянки з трьома міжпідстанційними зонами

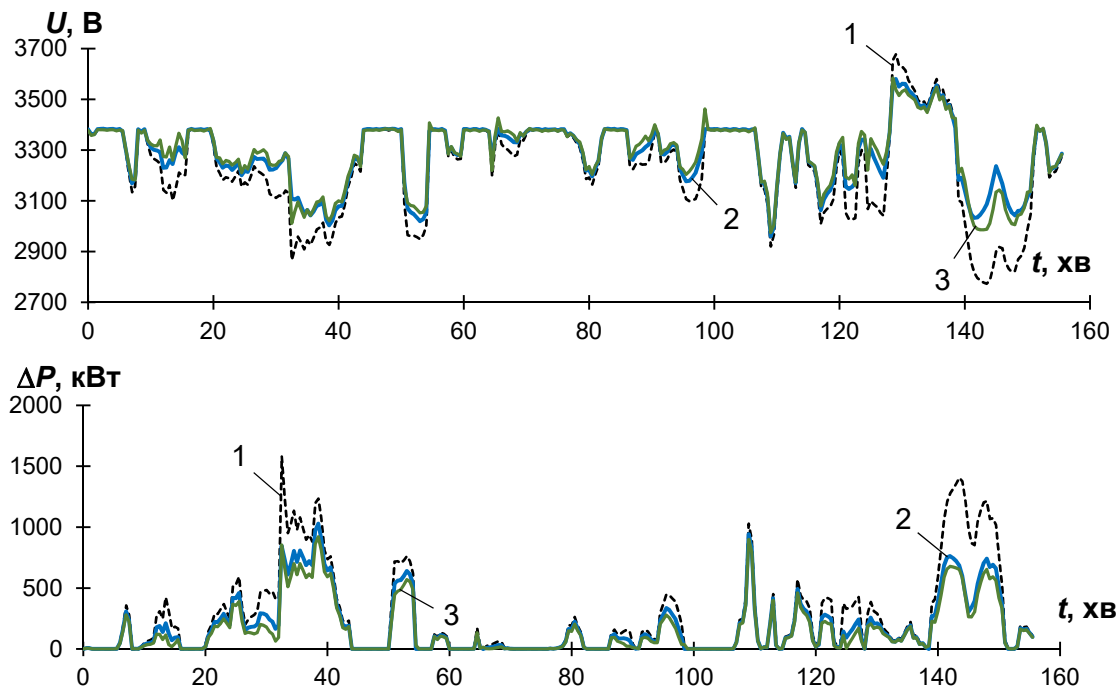


Рисунок 11 – Напруги на струмоприймачі електровоза для реальної ділянки з фактичним профілем навантаження та втрати потужності в тяговій мережі (1 – вихідний варіант; 2 – некеровані підстанції; 3 – керовані пункти підсилення)

Реалізувати систему стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму пропонується шляхом моніторингу розподілу напруги уздовж міжпідстанційної зони за допомогою пристроїв вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних. Після цього необхідно обчислити потужність та регулювати величину її генерації системою управління, враховуючи кількість підсилюючих пунктів, які розподілені уздовж електрифікованої залізниці постійного струму (рис. 12).

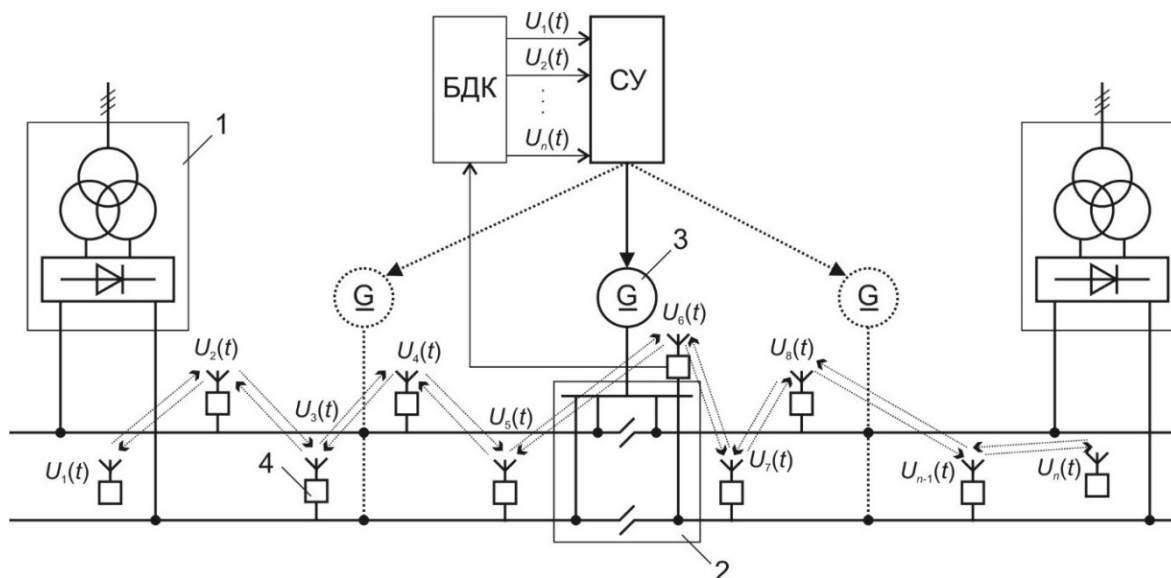


Рисунок 12 – Схема електрифікованої ділянки із системою моніторингу та регулювання напруги

Для проведення досліджень впливу відстані між розташуванням приладів на функціонування системи використано математичну модель з просторово-часовим уявленням процесів у системах тягового електропостачання. Для кожного моменту часу, з кроком, рівним інтервалу розташування приладів, визначається крива розподілу напруги в контактній мережі для заданого в цей момент часу навантаження на ділянці. На підставі відстаней між приладами і питомого опору контактної мережі визначається орієнтовне значення струмів на кожній з ділянок між приладами. Векторний добуток одержуваних таким чином функцій розподілу втрат напруги і струмів в контактній мережі з похибкою визначить значення втрат потужності. Похибка в цьому випадку буде зумовлена періодами часу перебування навантаження між точками вимірювання напруги.

На рис. 13 наведено отримані характеристики похибки запропонованої системи моніторингу залежно від відстані між розташуванням вимірювальних пристроїв. Залежність має складний характер, у загальному випадку зі зменшенням кількості приладів на ділянці похибка зростає. Максимальне значення може досягати 21 % (рис. 13, а). У більш вузькому діапазоні розташування приладів (рис. 13, б) інтервали зміни похибок становлять 1 – 3 %.

Як показали дослідження, з похибкою не більше 5 % при визначенні керуючої послідовності впливів можуть бути застосовані штучні нейронні мережі, які дозволяють використання розроблених методів при технічній реалізації в системах реального часу. Для вказаної похибки та забезпечення швидкодії достатньо

використати тришарову структуру нейронної мережі, при цьому кількість входних нейронів визначатиметься кількістю точок вимірювання напруги в контактній мережі, а вихідних – кількістю пунктів підсилення на ділянці.

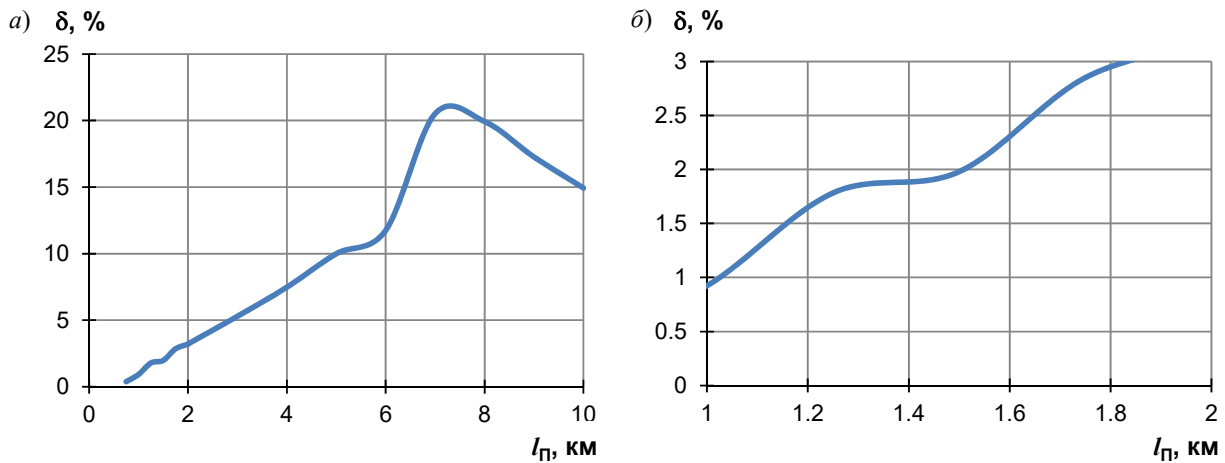


Рис. 13. Залежності похибки вимірювання втрат електроенергії в контактній мережі від відстані між вимірювальними приладами

У шостому розділі розглянуто питання удосконалення методів узгодженої взаємодії систем тягового із системами зовнішнього електропостачання.

Для зниження в тяговій мережі змінного струму транзитних перетікань потужності за наявності кута зсуву фаз між векторами однойменних первинних напруг досліджено варіанти перемикання положень ацапф трансформатора та застосування поздовжньої і поперечної компенсації реактивної потужності. Оскільки під дією різниці напруг, зумовленою кутом зсуву фаз, тяговою мережею, яка має активно-індуктивний характер, протікає практично активний вирівнювальний струм, то засоби лінійного регулювання напруги виявились неефективними.

Так, на рис. 14 показано результати дослідження при різних положеннях ацапф трансформатора на суміжних тягових підстанціях. Наведені залежності показують, що в таких умовах різні положення ацапф лише збільшать значення вирівнювальних струмів. Для дослідження впливу поздовжньої та поперечної компенсації реактивної потужності на характер вирівнювальних струмів використані схеми заміщення тягової мережі, які параметри компенсації враховують у параметричному вигляді (рис. 15, 16).

У загальному вигляді вираз для знаходження вирівнювального струму в тяговій мережі при поздовжній компенсації сформовано у вигляді

$$\underline{I}_{\text{вир}}(X_C) = \frac{\underline{U}_1 - \underline{U}_2}{(r_0 + jx_0) \cdot L - jX_C}, \quad (16)$$

де $\underline{U}_1, \underline{U}_2$ – вектори напруги на шинах суміжних тягових підстанцій, В;

$r_0 + jx_0$ – питомий опір тягової мережі, прийнято $0,2 + j 0,4$ Ом/км;

L – довжина міжпідстанційної зони, приймається рівною 50 км;

X_C – опір пристрою поздовжньої компенсації, Ом.

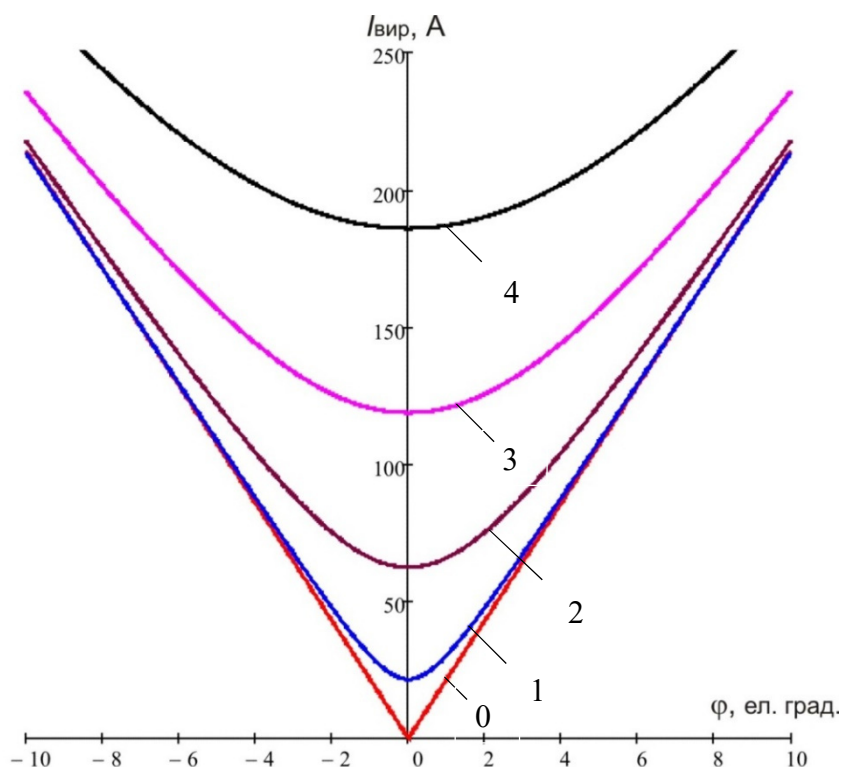


Рисунок 14 – Залежності вирівнювальних струмів в тяговій мережі на фазовій площині від положень перемикачів апцапф трансформаторів

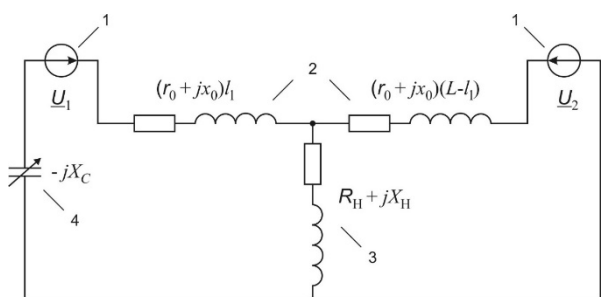


Рисунок 15 – Схема заміщення міжпідстанційної зони при застосуванні поздовжньої компенсації

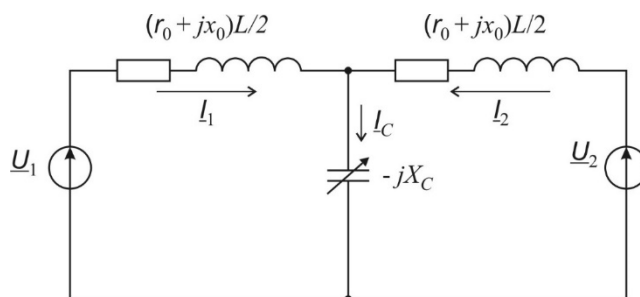


Рисунок 16 – Схема заміщення міжпідстанційної зони при застосуванні поперечної компенсації

Для дослідження характеристик вирівнювального струму при застосуванні поперечної компенсації значення струмів навантаження та струму компенсації при параметричному заданні компенсуючого пристрою описано системою

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_C = 0; \\ I_1 (r_0 + jx_0)L/2 - jX_C \cdot I_C = U_1; \\ I_2 (r_0 + jx_0)L/2 - jX_C \cdot I_C = U_2. \end{cases} \quad (17)$$

Аналіз отриманих результатів для кута зсуву фаз між векторами напруги при граничному значенні 10 електричних градусів показав, що найбільший вплив на модуль вирівнювального струму має поздовжня компенсація (рис. 17). Резуль-

тати також показали, що пристрої і поздовжньої, і паралельної компенсації змінюють фазовий зсув вирівнювального струму (рис. 18). За допомогою отриманих залежностей доцільно визначити такі параметри пристроїв компенсації реактивної потужності, які змінять кут зсуву вирівнювального струму якомога ближче до 90° , тим самим переведуть проблему вирівнювальних струмів у реактивну площину.

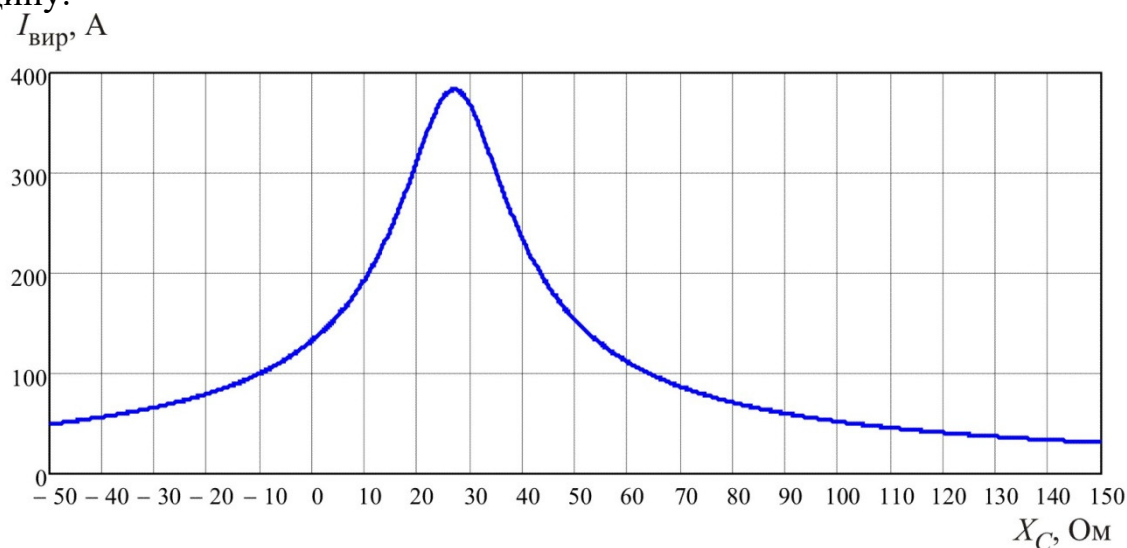


Рисунок 17 – Залежність модулю вирівнювального струму від опору поздовжньої компенсації

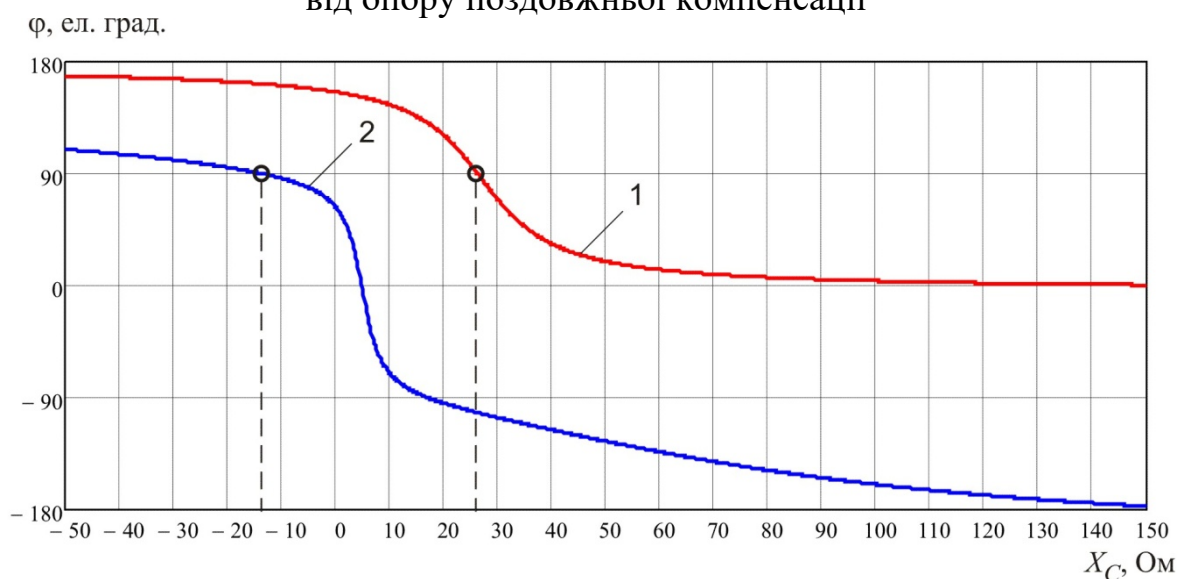


Рисунок 18 – Залежності кута навантаження вирівнювального струму для різних видів компенсації: 1 – поздовжньої; 2 – поперечної

У якості раціонального кута зсуву вирівнювального струму відносно напруж плечей живлення необхідно прийняти найбільш близький до 90° (рис. 19). З урахуванням того що вирівнювальний струм для однієї тягової підстанції буде активним, а для іншої – ємнісним, результуючий кут отримуємо з виразу

$$\varphi_{\text{вир}} = \frac{180 - \psi(\underline{U}_1)}{2}. \quad (18)$$

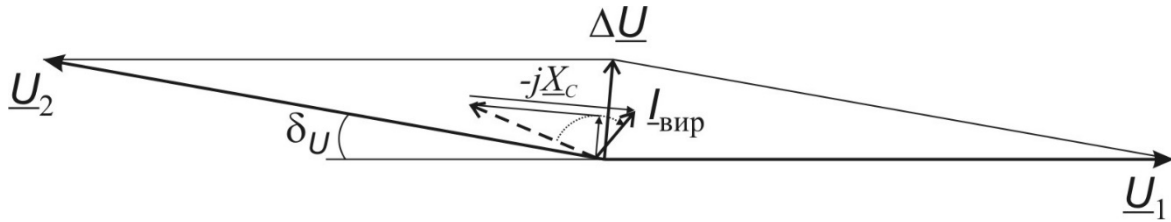


Рисунок 19 – Векторна діаграма визначення раціонального кута зсуву вирівнювального струму в тяговій мережі змінного струму

Виконані дослідження показали, що ємнісний опір пристрою поздовжньої компенсації для досягнення вимоги (18) не буде змінюватись залежно від кута зсуву фаз однойменних напруг первинної мережі, що дозволяє визначити його значення наведеним методом і для будь-яких інших значень.

З огляду на невелике значення перетікань реактивної електроенергії для тягових підстанцій постійного струму жоден зі способів застосування регульованої компенсації не набув поширення. Тому в роботі запропонована методика пошуку оптимальної потужності нерегульованого компенсуючого пристрою Q_K , яка відповідає мінімуму цільової функції. Виходячи з методу оплати за перетікання реактивної потужності за відомою методикою, складена цільова функція

$$\Pi = (WQ_{\text{СП}} + 3 \cdot WQ_{\text{ГЕН}}) \left[1 + 1,3(\text{tg}\varphi - 0,25)^2 \right] DT, \quad (19)$$

де $WQ_{\text{СП}}$ – величина спожитої реактивної енергії за розрахунковий період, квар·год;

$WQ_{\text{ГЕН}}$ – величина генерованої реактивної енергії за розрахунковий період з мережі споживача в мережу енергопостачальної компанії, квар·год;

$\text{tg}\varphi$ – коефіцієнт реактивної потужності;

D – економічний еквівалент реактивної потужності, кВт/квар;

T – середньозакупівельний тариф на активну електроенергію, грн/кВт·год;

У свою чергу, спожита $WQ_{\text{СП}}$ та генерована $WQ_{\text{ГЕН}}$ реактивні енергії можуть бути визначені як площі кривої добового споживання реактивної потужності з урахуванням встановленої потужності Q_K в певні відрізки часу (рис. 20), а саме:

$$WQ_{\text{СП}} = \int_{t_0}^{t_1} (Q(t) - Q_K) dt + \int_{t_2}^{t_3} (Q(t) - Q_K) dt + \dots; \quad (20)$$

$$WQ_{\text{ГЕН}} = \int_{t_1}^{t_2} (Q_K - Q(t)) dt. \quad (21)$$

У результаті чисельного розрахунку цільової функції (19) для дискретних значень потужності компенсуючого пристрою Q_K можна отримати залежність

$P = f(Q_K)$, яка матиме мінімум (рис. 21) залежно від реального профілю навантаження підстанції.

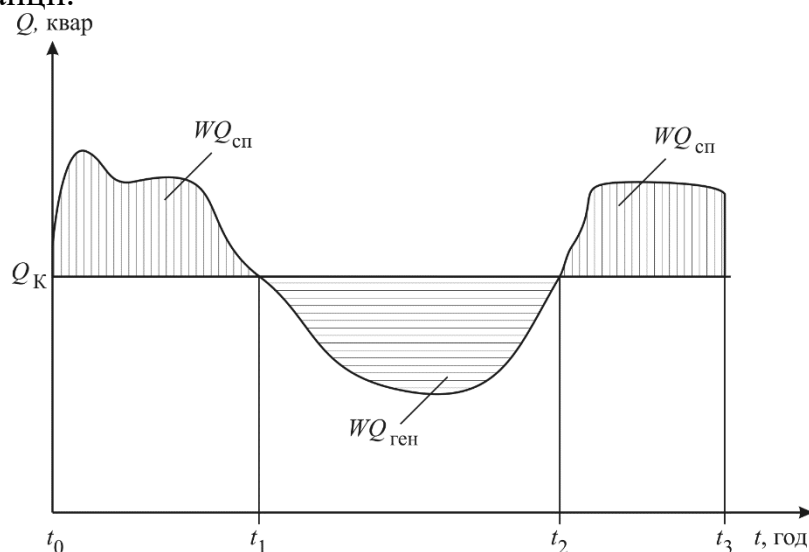


Рисунок 20 – Визначення складових цільової функції за профілем реактивного навантаження

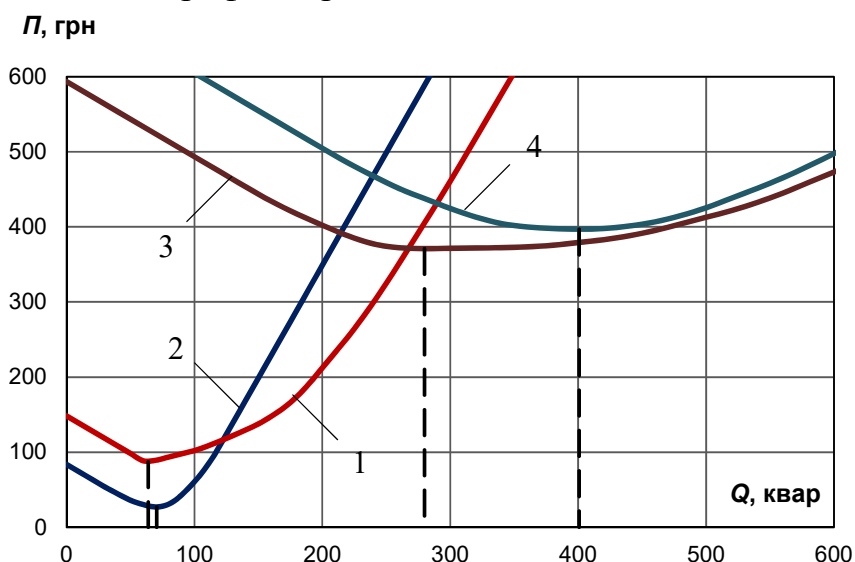


Рисунок 21 – Залежності плати за перетікання реактивної електроенергії від потужності компенсуючого пристрою для профілей навантаження підстанцій (1-4)

Для діючих залізниць з ринковими відносинами у сфері електроенергетики на тягову підстанцію постійного струму залежно від розташування та завантаженості припадає від 84 до 705 грн плати за перетікання реактивної електроенергії на добу (за цінами 2016 р.). Розрахунки, які виконані на підставі профілів навантаження реальних тягових підстанцій постійного струму Придніпровської залізниці з використанням запропонованої методики показують, що можна досягти зниження добової вартості перетікань реактивної електроенергії на величину від 56 до 308 грн.

Запропоновану методику визначення раціональної потужності нерегульованих компенсуючих пристроїв для забезпечення максимального зниження

плати за перетікання реактивної електроенергії можна поширити й на інші промислові споживачі.

Вважаючи активні та реактивні складові комплексних величин струмів тягового навантаження випадковими двовимірними розподіленими величинами окремо для системи постійного та змінного струму, визначено характер та окремі точки режимів, довкола яких орієнтуються ймовірності зміни режимів системи електропостачання. На підставі аналізу виконаних експериментальних вимірювань встановлено, що між активними та реактивними складовими струмів навантаження наявна додатна нелінійна кореляція, при чому вона характерна лише для систем електричної тяги постійного струму. Це пояснюється тим, що безпосередньо електрорухомий склад постійного струму та його режими роботи не впливають на природу виникнення реактивної потужності. Що не можна сказати про систему змінного струму, де кореляція в загальному випадку відсутня через прямий вплив додаткових факторів, що в загальному випадку дає підстави вважати активні та реактивні складові тягових струмів незалежними величинами стосовно системи електропостачання.

У результаті виконання статистичних розрахунків на рис. 22 представлено щільності ймовірностей двовимірної випадкової величини трифазного струму навантаження тягової підстанції постійного та змінного струму.

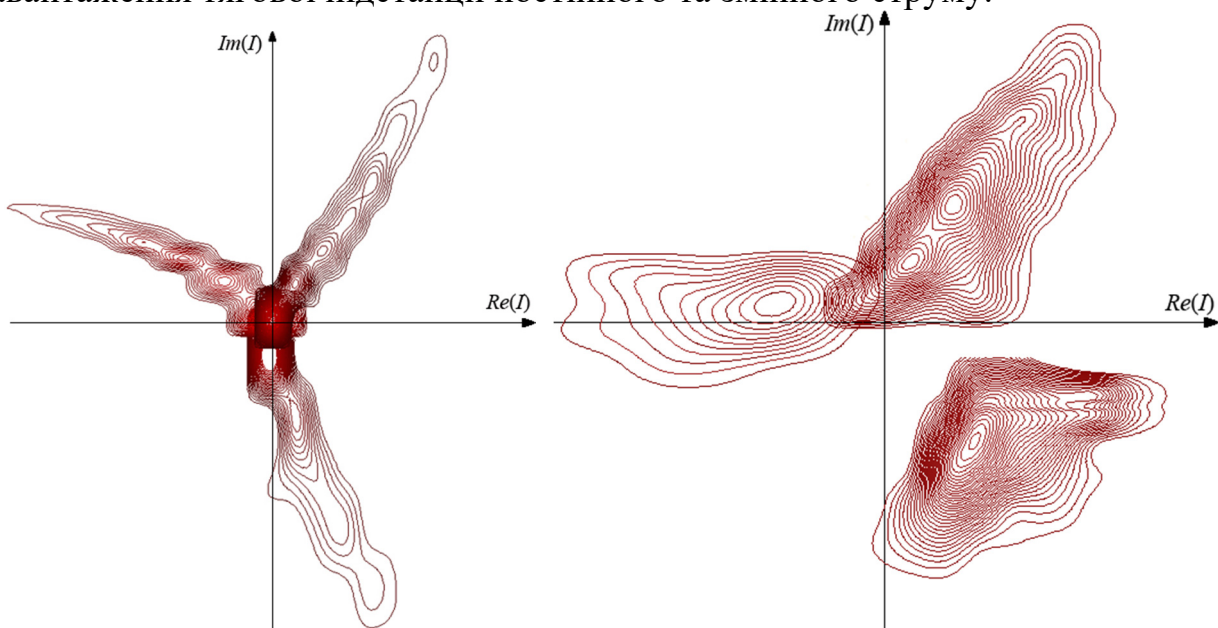


Рисунок 22 – Лінії рівня струму тягової підстанції постійного струму (зліва) та змінного струму (справа) як двовимірної випадкової величини

Так, у системі постійного струму спостерігається 3 стійкі точки режиму електропостачання, при чому в контексті загалом симетричної роботи кожної фази. У системі ж змінного струму режим електроспоживання у двох робочих фазах суттєво відрізняється від третьої (недозавантаженої). Порівняно із системою постійного струму, можна констатувати більший ступінь невизначеності та розкиду активної і реактивної складових струму.

Гармонійний вплив систем тягового електропостачання кількісно оцінено шляхом використання спрощених моделей некерованих випрямлячів. Так, для

системи змінного струму гармонійний склад струму електровоза визначено аналітичним розкладанням кусково-заданої функції пульсуючого струму для мостового однофазного випрямляча; для системи постійного струму – відповідним чином розкладались струми фаз 6-пульсної та 12-пульсної схем випрямлення.

За допомогою спрощених моделей випрямлячів визначено емісію вищих гармонійних складових зі сторони тягового навантаження. Очікувані значення коефіцієнта нелінійних спотворень (THD) струму складають: 42,6 % (змінний струм), 28,5 % (постійний струм, 6-пульсна схема), 13,7 % (постійний струм, 12-пульсна схема). У перерахунку від споживаної потужності залежності зміни емісії струмів вищих гармонійних складових, які наведені на рис. 23, показують, що для однієї споживаної потужності найбільшу та найменшу емісію має система 3,3 кВ з 6-пульсною схемою та 12-пульсною схемою випрямлення відповідно. Система змінного струму 27,5 кВ займає проміжне положення.

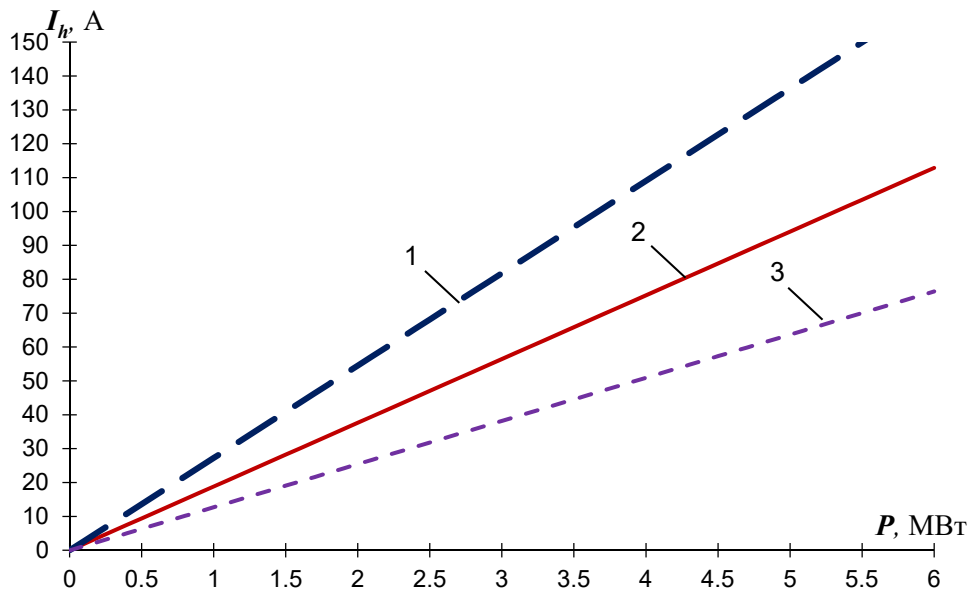


Рисунок 23 – Емісія вищих гармонік струму системами електричної тяги:
1 – 3,3 кВ (6-пульсна схема); 2 – 27,5 кВ; 3 – 3,3 кВ (12-пульсна схема)

Таким чином, показано, що процеси взаємодії систем тягового електропостачання із системами зовнішнього електропостачання зумовлені специфічними режимами роботи та електроустаткуванням, що міститься у великій кількості складних підсистем, які активним чином взаємодіють між собою.

У *сьомому розділі* наведено результати впровадження розроблених методів розрахунку керуючої послідовності впливів у вигляді інформаційного забезпечення для інтелектуалізації систем електропостачання електрифікованих залізниць.

Для систем тягового електропостачання, що в перспективі будуть функціонувати у складі комп'ютерно-інтегрованих інформаційних систем, розроблено алгоритми та спеціальний програмний продукт, призначення якого полягає у розрахунку режимних показників з урахуванням технічних засобів поліпшення якості електричної енергії та у виконанні розрахунків оптимальних параметрів системи

тягового електропостачання та визначення керуючої послідовності впливів з метою підвищення ефективності режиму роботи системи тягового електропостачання.

Виконані техніко-економічні розрахунки показали, що модернізація системи обліку електричної енергії на основі розробленого пристрою вимірювання напруги постійного струму з бездротовою передачею даних має приведені витрати на 56,8 тис. грн менші, ніж для існуючих схемних рішень. У цілому застосування системи стабілізації напруги в контактній мережі, маючи відносні капіталомісткі витрати, характеризується орієнтовним терміном окупності до 2 років.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі викладених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна проблема підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованого залізничного транспорту за рахунок створення керуючої послідовності впливів, яка забезпечує оптимальний перерозподіл потоків потужності в системах тягового електропостачання, а також шляхом узгодження режимів взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають в такому.

1. У результаті виконаного у дисертації аналізу проблеми енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць встановлено, що наявний рівень технологічних втрат у системах тягового електропостачання для існуючих на сьогодні режимів електропостачання не задовольняє сучасним вимогам. У системах електричної тяги змінного струму, які характеризуються рівнем втрат 5-8 %, створюються умови для транзитних перетікань потужностей, які не правильно враховуються системою обліку та спричиняють додаткові витрати на закупівлю електроенергії. У системах постійного струму з рівнем втрат 14-17 % наявні відхилення напруги на струмоприймачах електрорухомого складу, які обмежують провізну і пропускну спроможності електрифікованих ділянок залізниць та, у цілому, ускладнюють виробничо-господарську діяльність.

2. Виконана в роботі формалізація дисипативного процесу виникнення втрат електроенергії в тяговій мережі у вигляді добутку адитивних функцій розподілу спаду напруги та струму в контактній мережі дозволяє врахувати керовані елементи в системах електричної тяги шляхом застосування принципу суперпозиції. Аналітичні вирази функції опору, які отримані в дисертації для всіх схем живлення тягової мережі, дозволяють в інженерній та науковій діяльності у спрощеній формі розраховувати миттєві схеми, а на практиці – розробити систему керування пунктами підсилення тягової мережі шляхом використання формального підходу до просторово-часового розрахунку систем тягового електропостачання незалежно від схеми живлення та місцевих особливостей електрифікованих ділянок залізниць.

3. Заміна тягового навантаження джерелом ідеального струму в існуючих методах розрахунку миттєвих схем вносить похибку більше 5 % в розрахунки режимних показників системи тягового електропостачання при значенні потужності, що реалізується, більше 8 МВт. Визначення струму тягового навантаження за

допомогою запропонованого аналітичного виразу дозволяє виключити похибку, знизивши її до величини 4,7 %, та автоматизувати розрахунки параметрів режиму систем тягового електропостачання за наявності в системі електропостачання керування пунктів підсилення.

4. У результаті комплексного дослідження, проведеного для тягових підстанцій електрифікованих залізниць, показано, що енергоефективність системи тягового електропостачання змінного струму проти системи постійного струму не повною мірою відповідає існуючим критеріям через наявні спотворення якості електроенергії, що складають: у частині несинусоїдності напруги – до 5,84 % проти 2,35 %; несиметрії напруги – до 2,95 % проти 0,82 %; коефіцієнта потужності – 0,7..0,8 проти 0,95..0,98; співвідношення складових неактивної до активної потужності в квадратах – 50/50 % проти 10/90 %. Крім цього, система змінного струму допускає транзитні перетікання потужністю до 4 МВт за наявності кута зсуву фаз однойменних напруг в первинній мережі до 10 електричних градусів.

5. Встановлено, що при роботі випрямлячів у системі постійного струму за різних рівнів несиметрії живильної напруги спостерігається зміна співвідношення вищих гармонік та коефіцієнта потужності на виході випрямляча таким чином, що при несиметрії напруги до 6 % у фазі із заниженою напругою коефіцієнт потужності збільшується на 1 %, а у інших фазах – зменшується на 3-5 %.

6. Для електронних приладів обліку електроенергії в умовах, що відповідають реальному стану показників якості електроенергії тягових підстанцій постійного і змінного струму, при вимірюванні активної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням (0,5 %), а при вимірюванні реактивної потужності основна відносна похибка відповідає допустимим за класом точності значенням (1,0 %) лише для реактивної потужності першої гармоніки та при коефіцієнті спотворення форми струму не більше 25 %.

7. Підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць постійного струму досягається шляхом застосування розробленої системи стабілізації напруги, яка має розподілену систему синхронних вимірювань та обчислювальний комплекс, в якому за допомогою штучної нейронної мережі в режимі реального часу визначається керуюча послідовність впливів з подальшою передачею до підсилюючих пунктів на ділянці залізниці. Такий підхід дозволяє знизити втрати в тяговій мережі постійного струму з 14-17 % до 7-8,5 % від споживання електроенергії на тягу залежно від кількості поїздів, що одночасно перебувають на міжпідстанційній зоні.

8. У режимах електропостачання тяги залізниць змінного струму найбільший вплив на характер вирівнювальних струмів має поздовжня компенсація реактивної потужності, яку найбільш доцільно виконувати у відсмоктуючому фідері тягової підстанції. Методика визначення параметрів поздовжньої компенсації дозволяє перевести проблему транзитних перетікань у реактивну площину з подальшим застосуванням сучасних пристроїв поперечної компенсації (перетікання зменшуються з 4 МВт до 100-160 кВт), тим самим виключаючи закупівлю надлишкової електроенергії для електрифікованих залізниць.

9. Розроблений програмний комплекс складає альтернативу існуючим засобам моделювання та розрахунку параметрів режиму систем тягового електропостачання та дозволяє визначати пропускну спроможність електрифікованих ділянок, напруги на лімітуючих ділянках, втрати електроенергії, а також оцінювати технічні обмеження при підсиленні та оптимізації параметрів системи тягового електропостачання.

10. Удосконалені методи узгодженої взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання за рахунок методики вибору потужності компенсуючих пристроїв для сторони змінної напруги тягових підстанції постійного струму, за умови застосування статичних пристроїв компенсації, дозволяють знизити видатки на 250 тис. грн за рік, пов'язані з перетіканнями реактивної електроенергії.

11. Техніко-економічні розрахунки показали, що модернізація системи обліку електричної енергії на основі розробленого пристрою вимірювання напруги постійного струму з бездротовою передачею даних має приведені витрати на 56,8 тис. грн менші, ніж для існуючих схемних рішень. У цілому застосування системи стабілізації напруги в контактній мережі, маючи відносні капіталомісткі витрати, характеризується орієнтовним терміном окупності до 2 років та щорічним ефектом при широкому впровадженні в розмірі 2-2,5 млн грн.

Основні положення і результати дисертації опубліковано у виданнях, що індексуються Scopus:

1. Босий Д. О. Інтелектуальні системи в керуванні режимами систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць / Д. О. Босий // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 4. – С. 76-80.

2. Sychenko, V. G. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // The archives of transport. – 2015. – Vol. 35, Iss. 3. – P. 63–70.

в закордонних виданнях:

3. Босый Д. А. Проблемы качества электроснабжения промышленных потребителей от обмотки среднего напряжения тяговых подстанций переменного тока / Д. А. Босый // Problemy Kolejnictwa. – 2014. – Zeszyt 162. – С. 21-32.

4. Сыченко В. Г. Качество использования электроэнергии в системах электрической тяги / В. Г. Сыченко, Д. А. Босый // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4(48). – С. 143-149.

5. Bosiy D. O. Calculation of the traction power supply systems using the functions of resistance / D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // Problemy kolejnictwa. – 2015. – Vol. 59, Iss. 168. – P. 7-14.

в монографії:

6. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць : монографія / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий / Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. – Дніпропетровськ: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2015. – 344 с. – ISBN 978-966-97463-8-2.

у фахових виданнях:

7. Сиченко В. Г. Дослідження електромагнітних процесів у системі тягового електропостачання постійного струму: проблеми, технічні засоби та реалізація / В. Г. Сиченко, В. А. Зубенко, Д. О. Босий // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2011. – № 2. – С. 58-63.
8. Босий Д. О. Удосконалення непрямого методу обліку втрат електричної енергії в контактній мережі / Д. О. Босий, Т. І. Кирилук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 35-39.
9. Кузнецов В. Г. Уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети за счет регулирования графика движения поездов / В. Г. Кузнецов, К.А. Калашников, Д. А. Босый // Технічна електродинаміка. Темат. вип. – 2012. – С. 107-110.
10. Кузнецов В. Г. Облік втрат електричної енергії в тяговій мережі непрямим способом / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилук // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 42. – С. 103-109.
11. Кузнецов В. Г. Оптимизация потерь электроэнергии в контактной сети железнодорожного транспорта / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Праці інституту електродинаміки. – 2012. – Вип. 33. – С. 18-22.
12. Босий Д. О. Особливості роботи електронних лічильників у несинусоїдних режимах тягових підстанцій електричного транспорту / Д. О. Босий // Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – № 9 (115). – С. 29-37.
13. Bosiy D. O. Power quality complex estimation at alternating current traction substations / D. O. Bosiy // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – 2013. – № 4 (46). – С. 30-37.
14. Босий Д. О. Баланс електричної енергії тягової підстанції постійного струму за різних рівнів несиметрії напруги системи зовнішнього електропостачання / Д. О. Босий, Д. Р. Земський // Східно-Європейський журнал передових технологій. Энергосберегающие технологии и оборудование. – 2014. – № 2/8 (68). – С. 52-57.
15. Сыченко В. Г. Усовершенствование методологии расчета распределенной системы тягового электроснабжения с усиливающим пунктом / В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, Е. Н. Косарев // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – Спец. вип., том 2. – С. 8-18.
16. Босий Д. О. Облік електроенергії сучасними електронними лічильниками в умовах гармонійних спотворень / Д. О. Босий, О. М. Синьогіна // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 98-106.
17. Босий Д. О. Методика розрахунку миттєвих схем системи тягового електропостачання для споживання постійної потужності / Д. О. Босий // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 8. – С. 15-25.
18. Босий Д. О. Методика розрахунку оптимальної потужності пристроїв компенсації реактивної потужності тягових підстанцій постійного струму / Д. О. Босий // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2014. – № 93. – С. 33-37.

19. Босий Д. О. Застосування миттєвих характеристик до аналізу електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання змінного струму / Д. О. Босий // Гірничя електромеханіка та автоматика. – 2015. – № 94. – С. 37-42.

20. Босий Д. О. Забезпечення паралельної роботи тягових підстанцій змінного струму в умовах транзитних перетікань потужності / Д. О. Босий // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2015. – № 2. – С. 95-103.

21. Босий Д. О. Просторово-часова модель системи тягового електропостачання / Д. О. Босий // Вісник НТУ ХПІ. Серія: Електроенергетика та перетворювальна техніка. – 2015. – № 19 (1128). – С. 139-151.

22. Босий Д. А. Учет потерь электроэнергии в системах тягового электрообеспечения / Д. А. Босий // Вісник НТУ ХПІ. – 2015. – № 12 (1121). – С. 270-273.

23. Сиченко В. Г. Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з пунктами підсилення / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, Є. М. Косарев // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – № 6. – С. 95-103.

24. Саблін О. І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, Д. О. Босий, В. Г. Кузнецов та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 73-79.

25. Босий Д. О. Стан та перспективи розвитку енергетичної інфраструктури залізниць України / Д. О. Босий // Українська залізниця. – 2016. – № 9 (39). – С. 58-62.

у додаткових працях:

26. Босий Д. О. Взаємодія систем тягового з системами зовнішнього електропостачання / Д. О. Босий // Гірничя електромеханіка та автоматика. – 2015. – № 95. – С. 9-15.

27. Комп'ютерна програма «Автоматизована система складання енергоефективного графіку руху поїздів «Поток»: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 48202 / Калашников К.О., Кузнецов В.Г., Босий Д. О.; Україна / Зареєстровано 05.03.2013. – Київ: ДСІВУ, 5-3-2013.

28. Пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних: Пат. 95871 Україна, МПК G01R 19/257, H04W 4/20 / Босий Д. О.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – № U201408019; заявл. 16.07.14; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1. – 3 с.

29. Спосіб стабілізації напруги в контактній мережі електрифікованої ділянки постійного струму: Пат. 98483 Україна, МПК H02J 1/00, H02J 13/00 / Сиченко В. Г., Босий Д. О., Косарев Є. М.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U201412905; заявл. 02.12.14; опубл. 27.04.15, Бюл. № 8. – 3 с.

30. Комп'ютерна програма «Інтелектуальна система електропостачання транспорту» (Intelligence System of Electrified Transport): Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 60711 / Босий Д. О., Косарев Є. М.; Україна / Зареєстровано 20.07.2015. – Київ: ДСІВУ, 20-07-2015.

31. Логвінова Н. О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н. О. Логвінова, Д. О. Босий, О. М. Полях // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, 2012. – Вип. 42. – С. 110-113.
32. Bosiy D. O. Power quality complex estimation at AC traction substations / D. O. Bosiy // XI International Scientific Conference Modern Electric Traction (MET'2013), Warsaw, October 10-12 2013, p. 147-151.
33. Кузнецов В. Г. Управління транспортним потоком для зменшення експлуатаційних витрат електрифікованих залізниць / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, К. О. Калашников // Електрифікація транспорту. – 2013. – № 6. – С. 71-79.
34. Босий Д. О. Управління графіком руху поїздів для зменшення експлуатаційних витрат електрифікованих залізниць / Д. О. Босий, К. О. Калашников // Українські залізниці. – 2014. – № 4 (10). – С. 46-51.
35. Гончаров Ю. П. Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии / Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый и др. // Problemy Kolejnictwa. – 2014. – Zeszyt 162. – S. 65-82.
36. Босий Д. О. Інтелектуальні системи в керуванні режимами систем тягового електропостачання електрифікованих залізниць / Д. О. Босий // Матеріали Четвертої міжнародної конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ESS'15» 09.06-12.06.2015. – Київ, 2015. – С. 239-241.
37. Босий Д. О. Оптимізація потужності підсилюючих пунктів для живлення тягової мережі високошвидкісних магістралей / Д. О. Босий, О. А. Запара // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Електрифікація залізничного транспорту «ТРАНСЕЛЕКТРО-2015», 29.09 – 02.10.2015. – Одеса, 2015. – С. 29-30.
38. Босий Д. О. Проблеми забезпечення режиму напруги на струмоприймачі електрорухомого складу на ділянках зі складним профілем гірської місцевості / Д. О. Босий, Є. М. Косарев, А. І. Барна // III Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ-2015, 14.10 – 15.10.2015. – Вінниця, 2015. – С. 11.
39. Bosiy D. O. Control the traction power supply with the intelligent systems / D. O. Bosiy // IV International Conference Advanced Rail Technologies ART-2015, 18.11–19.11.2015, Poland. – Warszawa, 2015. – P. 27.
40. Босый Д. А. Усовершенствование имитационных средств моделирования систем тягового электроснабжения / Д. А. Босый, Е. Н. Косарев // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Наука, творчество и образование в области электроэнергетики и электротехники – достижения и перспективы», 19–20.11.2015, ДВГУПС. – Хабаровск, 2015. – С. 64-70.
41. Босый Д. А. Управление режимами систем тягового электроснабжения с помощью интеллектуальных систем / Д. А. Босый // VII Международная научно-практическая конференция «Проблемы безопасности на транспорте», 26.11-27.11.2015, Беларусь. – Гомель, 2015. – С. 16.

42. Кирилюк Т. І. Визначення коефіцієнту налаштування лічильника втрат в загальному виді / Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту «Транселектро-2012», 25-28.09.2012. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 25-26.

43. Bosiy D. O. The problems of power supply industrial consumers from medium-voltage winding of AC traction substations / D. O. Bosiy // Miedzynarodowa Konferencja Naukowa Niewzawodnosc w transporcie szynowym i mozliwosci jej zwiakszania, 20-21.11.2013, Poland. – Warszawa, 2013. – S. 55.

44. Босий Д. О. Дослідження ступінчастої компенсації реактивної потужності на фізичному макетів / Д. О. Босий, А. С. Дем'яненко // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», 11-14.06.2013. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 10.

45. Кузнецов В. Г. Схемна реалізація пристрою для вимірювання втрат електроенергії в контактній мережі / В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, Т. І. Кирилюк // II Міжнародна науково-технічна конференція «Оптимальне керування електроустановками» ОКЕУ-2013, 22-24.11.2013. – Вінниця, 2013. – С. 51.

46. Босий Д. О. Система розподіленого вимірювання рівня напруги електрифікованих ділянок постійного струму / Д. О. Босий // Тези доповідей 74-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 15-16.05.2014. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 151-152.

47. Босий Д. О. Стабілізація напруги на струмоприймачеві електрорухомого складу високошвидкісних магістралей постійного струму / Д. О. Босий, А. А. Сидоров // Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Електрифікація транспорту «Транселектро-2014», 23-26.10.2014. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 14-15.

48. Кравчук С. Л. Комплексні дослідження процесів електроспоживання на тягових підстанціях Південної залізниці / С. Л. Кравчук, В. М. Козачок, Д. О. Босий // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», 11-13.06.2014, Воловець. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 82.

49. Сиченко В. Г. Проблема перетоків електроенергії між тяговими підстанціями змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, С. М. Міщенко // Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», 11-13.06.2014, Воловець. – Дніпропетровськ, 2014. – С. 137-138.

50. Босий Д. О. Удосконалення режиму напруги тягової підстанції змінного струму при транзиті потужності тяговою мережею / Д. О. Босий, С. М. Міщенко, О. В. Шама // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», 10-13.06.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 31.

51. Земський Д. Р. Дослідження порушення енергетичного обміну між ви-
прямним агрегатом тягової підстанції та живлячою мережею / Д. Р. Земський,

Д. О. Босий // Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості», 10-13.06.2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 53.

АНОТАЦІЯ

Босий Д. О. Розвиток наукових основ підвищення енергоефективності режимів електропостачання електрифікованих залізниць. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2017.

Дисертація присвячена проблемі зниження втрат електроенергії в системах тягового електропостачання постійного струму та зменшенню впливу транзитних перетікань потужності і перетікань реактивної електроенергії при взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання. В роботі проаналізовано стан проблеми енергоефективного електропостачання залізничного транспорту, вивчені сучасні механізми ефективного використання електроенергії. Розвинуто методи розрахунку систем тягового електропостачання з урахуванням інтелектуально-керованих елементів в системах електричної тяги постійного струму. Проаналізовано режими споживання електроенергії в системах тягового електропостачання постійного та змінного струму. Розроблено наукові основи визначення керуючої послідовності впливів на пристрої підсилення тягових мереж постійного струму та удосконалені методи узгодженої взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання.

Ключові слова: енергоефективність, електротранспорт, постійний струм, змінний струм, режим напруги, інтелектуальні технології, оптимальне керування, перерозподіл потоків потужності.

АННОТАЦИЯ

Босый Д. А. Развитие научных основ повышения энергоэффективности режимов электроснабжения электрифицированных железных дорог. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.09 – електротранспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепро, 2017.

Диссертация посвящена проблеме снижения потерь электроэнергии в системах тягового электроснабжения постоянного тока и снижения влияния транзитных перетоков мощности и перетеканий реактивной электроэнергии при взаимодействии систем тягового и внешнего электроснабжения. В работе проанализирована проблема энергоэффективного электроснабжения железнодорожного транспорта и выявлено несоответствие текущего уровня технологических потерь современным требованиям. В системах электрической тяги переменного тока создаются условия для транзитных перетоков мощности, в

системе постоянного тока – отклонения напряжений на токоприемниках электроподвижного состава ограничивают провозную и пропускную способности электрифицированных участков. Изучены современные механизмы эффективного использования электроэнергии, которые применяют интеллектуальные подходы в управлении режимами электроснабжения. Развита методика расчета систем тягового электроснабжения с учетом интеллектуально-управляемых элементов в системах электрической тяги постоянного тока, которые позволяют исключить замену тяговой нагрузки источником идеального тока. Проанализированы режимы потребления электроэнергии в системах электроснабжения постоянного и переменного тока, что позволило установить причины снижения эффективности систем тягового электроснабжения, а именно: значительные отклонения напряжения на токоприемниках, наличие перетоков мощности, влияние гармонических искажений на систему учета электроэнергии. Разработаны научные основы определения управляющей последовательности воздействий на устройства усиления тяговых сетей постоянного тока, реализация которых предусматривается применением распределенной системы синхронных измерений с последующим определением токов усиливающих пунктов нейронной сетью в режиме реального времени. Предложенный подход позволяет снизить потери электроэнергии в тяговой сети постоянного тока практически в 2 раза, причем эффект в снижении зависит от количества поездов, которые одновременно находятся на межподстанционной зоне. Усовершенствованные методы согласованного взаимодействия систем тягового и внешнего электроснабжения предусматривают применение компенсации реактивной мощности для перевода проблемы транзитных перетоков в реактивную плоскость для системы переменного тока. При этом в качестве критерия максимизации используется угол сдвига фаз между векторами одноименных напряжений первичной сети. Для системы постоянного тока предлагается учет реального профиля нагрузки при дискретном определении мощности компенсирующего устройства в аргументах целевой функции. Предложенные усовершенствования методов согласованного взаимодействия позволяют снизить издержки на 250 тыс. грн в год, связанные с перетеканиями реактивной электроэнергии. Применение системы стабилизации напряжения в контактной сети характеризуется сроком окупаемости около 2 лет и ежегодным экономическим эффектом при широком внедрении в размере 2-2,5 млн грн.

Ключевые слова: энергоэффективность, электротранспорт, постоянный ток, переменный ток, режим напряжения, интеллектуальные технологии, оптимальное управление, перераспределение потоков мощности.

ANNOTATION

Bosiy D. O. The development of scientific bases of energy efficiency modes of power supply the electrified railways. – Manuscript.

The dissertation on receipt for a scientific degree of the doctor in technical sciences by specialty 05.22.09 – electric transport. – Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Dnipro, 2017.

The dissertation is devoted to problem of reducing power losses in DC traction power supply systems and reducing the effects of transit power flows and reactive power in the interaction of traction and external power supply systems. The paper analyzes the state of the problem of energy-efficient electricity supply of the railway transport. The modern mechanisms of efficient use of electricity are also studied. Methods for calculating traction power supply systems with allowance for intellectually controllable elements in direct current electric traction systems are developed. The modes of electricity consumption in DC and AC power supply systems were analyzed. The scientific basis for determining the control sequence of impacts on devices for reinforcement of DC traction networks has been developed and methods for coordinated interaction of traction and external power supply systems have been improved.

Keywords: energy efficiency, electric transport, direct current, alternating current, voltage mode, intelligent technology, optimal control, redistribution of power flows.

БОСИЙ ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ
РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ**

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Підписано до друку 31.03.2017

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 1,9.
Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 прим.

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003

Адреса університету і ділянки оперативної поліграфії:
49010, Дніпро, вул. Лазаряна, 2.