

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені
академіка В. Лазаряна

КУЗНЕЦОВ ВАЛЕРІЙ ГЕННАДІЙОВИЧ



УДК 621.331.024:621.311.004.18

**РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЯГИ ПОЇЗДІВ
ПОСТІЙНОГО СТРУМУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 2012

Дисертація є рукописом.

Роботу виконано в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, доцент
Сиченко Віктор Григорович,
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, завідувач кафедри електропостачання залізниць.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Денисюк Сергій Петрович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», професор кафедри електропостачання;

доктор технічних наук, професор
Андрієнко Петро Дмитрович,
Запорізький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних та електронних апаратів;

доктор технічних наук, професор
Хворост Микола Васильович,
Харківська національна академія міського господарства, декан факультету заочного навчання.

Захист дисертації відбудеться “ 6 ” *грудня* 2012 р. о 14³⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпропетровськ, вул. Лазаряна, 2.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Автореферат розіслано “ __ ” _____ 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
д-р техн. наук, доцент



А. М. Муха

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми

Енергозбереження на залізничному транспорті в умовах ринкової економіки є одним з основних пріоритетів науково-технічної політики Укрзалізниці. Енергозбереження та раціоналізацію технологічних процесів у всіх службах і господарствах залізничного транспорту можна розглядати як головний внутрішній резерв залізничного транспорту в найближчій перспективі.

Підвищення конкурентоспроможності та економічності роботи залізничного транспорту України неможливе без вирішення низки першочергових проблем: забезпечення раціональної технології перевізного процесу за енергетичними, економічними й екологічними критеріями; розвитку інфраструктури залізничного транспорту для забезпечення швидкісного руху; удосконалення рухомого складу; планування споживання енергетичних ресурсів; впровадження ефективних методів управління залізничним транспортом на всіх рівнях виробничого циклу, серед яких виділяється проблема енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму. Це важлива складова в загальній проблемі раціоналізації перевізного процесу.

Проблема енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів магістральних залізниць завжди цікавила багатьох вчених. Значний внесок у її вирішення зробили: П. Д. Андрієнко, Б. А. Аржанніков, М. П. Бадьор, О. Л. Бикадоров, Б. М. Бородулін, А. Т. Бурков, Г. К. Гетьман, Ю. П. Гончаров, О. Л. Гуртовцев, В. Л. Григор'єв, В. Т. Доманський, Ю. І. Жарков, Ю. С. Железко, І. П. Ісаєв, О. В. Котельников, Р. Р. Мамошин, К. Г. Марквардт, Г. Г. Марквардт, Р. І. Мірошніченко, О. М. Митрофанов, В. Я. Овласюк, М. В. Панасенко, В. М. Пупинін, Є. П. Фігурнов, М. В. Хворост, В. Т. Черемісін. Для розв'язання завдання вдосконалювання управління енергопостачанням важливими є праці Д. А. Арзамасцева, Б. М. Бородуліна, В. А. Венікова, С. І. Випанасенка, Л. А. Германа, С. П. Денисюка, Б. Є. Динькіна, В. С. Кохановича, А. В. Праховніка, В. В. Скалозуба, а також інших вчених.

Більша частина вказаних досліджень була виконана в період планової економіки. Тому вибір енергозберігаючих заходів, визначення раціональних режимів систем електропостачання магістральних залізниць постійного струму здійснювалися без урахування реалій ринкової економіки, коли існують різні варіанти розрахунків за спожиту електроенергію (за одноставковими тарифами, диференційованими тарифами або оптовими цінами за електроенергію). Частка енергетичної складової в тарифі за перевезення на сьогодні досягла 20 %. З урахуванням світових тенденцій вона буде підвищуватися й надалі. Тому під час прийняття управлінських рішень на перше місце виходять не технічні показники, а економічні (наприклад, вартість спожитої електроенергії). При цьому проблема енергозбереження має комплексний, багаторівневий і багатофакторний характер. Тому тема дисертаційної роботи, яка пов'язана з розвитком теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму, являється актуальною для залізничного транспорту України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Дисертаційна робота виконана відповідно до таких державних програм і науково-дослідних робіт за завданням Укрзалізниці:

- Енергетична стратегія України на період до 2030 р., затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 15.03.2006 р. № 145;
- Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010 – 2015 роки, затверджена постановою Кабінету Міністрів України від 1 березня 2010 р. № 243 із змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів від 27.04.2011 №447 та від 25.01.2012 № 105.
- Постанова Кабінету Міністрів України від 23.04.1999 р. № 661 «Про заходи державної підтримки залізничного транспорту»;
- Програма енергозбереження на залізничному транспорті України на період 1996 – 2010 року, ухвалена рішенням науково-технічної ради Укрзалізниці від 26.06.1996 р.

Науково-дослідні роботи, у яких автор був науковим керівником: «Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів з розробкою рекомендацій» (№ ДР 0111 U003607), «Дослідження наднормативних небалансів обліку електроенергії на тягових підстанціях Донецької залізниці для тягової підстанції Штеровка і розробка рекомендацій з їхнього приведення до нормативних вимог» (№ ДР 0111U003607), «Інструкція з нормування витрат електроенергії на власні потреби підстанцій 6-220 кВ і розподільчих пунктів 6-10 кВ залізниць України» (№ ДР 0108U008042).

Особистий внесок автора в цих роботах полягає у виборі напрямків теоретичних та експериментальних досліджень, постановці та реалізації вирішуваних завдань та доведенні їх до практичної реалізації.

Науково-дослідні роботи, у яких автор був співвиконавцем звітів: «Інтелектуальні задачі і алгоритми для керування обладнанням електропостачання електрифікованих залізниць», (№ ДР 0199U001432), «Підвищення енергетичної ефективності і економічності роботи електротягових систем» (№ ДР 0103U005112), «Розробка технології енергооптимального керування обладнанням електропостачання електрифікованих ділянок залізниць» (№ ДР 0101U002583), «Розробка концепції енергетичної стратегії Укрзалізниці на період до 2010 р. і на перспективу до 2020 р.» (№ ДР 0106U005700), «Підвищення надійності обладнання контактної мережі залізниць» (№ ДР 0107U002523), «Розробка наукових основ раціональних режимів системи тягового електропостачання» (№ ДР 0110U000897), «Дослідження показників якості електроенергії на введеннях і фідерах тягових підстанцій постійного струму і розробка рекомендацій» (№ ДР 0107U010377).

Основні результати дисертаційної роботи отримані в ході виконання наведених вище досліджень.

Метою дисертаційної роботи є розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму для підвищення їх енергетичної та економічної ефективності.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

1. Здійснити комплексний аналіз стану систем електропостачання тяги поїздів постійного струму з питань енергозбереження.
2. Розробити метод розрахунку потенціалу енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму з урахуванням системного ефекту.
3. Розробити математичну модель задачі вибору енергозберігаючих заходів у системі електропостачання, вибрати та обґрунтувати метод її розв'язку.
4. Розробити математичні моделі надійності силового обладнання, економічного збитку від можливих відмов для задач регулювання режимів систем електропостачання залізниць постійного струму.
5. Удосконалити метод розрахунку систем електропостачання тяги поїздів в частині доповнення його виразами для розрахунку втрат потужності в елементах тягових підстанцій.
6. Вибрати й науково обґрунтувати метод розв'язку задачі визначення раціональних режимів систем електропостачання тяги поїздів постійного струму.
7. Удосконалити методи визначення норм витрат електроенергії на потреби стаціонарних споживачів в частині розробки регресійних залежностей для їх розрахунку.
8. Розробити системні науково обґрунтовані підходи до визначення норм витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій, постів секціонування і пунктів паралельного з'єднання.

Об'єкт дослідження – процеси передачі, перетворення і споживання електроенергії в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму.

Предмет дослідження – система електропостачання тяги поїздів постійного струму.

Методи досліджень. Основні теоретичні положення дисертації отримані за допомогою методів системного аналізу (при визначенні потенціалу енергозбереження), аналізу ієрархій (при виборі енергозберігаючих заходів), генетичних алгоритмів (при визначенні умов забезпечення раціональних режимів систем тягового електропостачання), структурно–логічного аналізу надійності (при визначенні показників надійності систем тягового електропостачання), регресійного аналізу (при створенні методології визначення норм витрат електроенергії для стаціонарних споживачів). Також використані методи дослідження експериментальних даних і математичної статистики (при дослідженні результатів вимірів витрат електроенергії на різних приєднаннях тягових підстанцій, напруг на шинах, небалансів електроенергії).

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які містяться в дисертації, достатньо обґрунтовані та вірогідні, оскільки:

- експериментальні дослідження коректно поставлено та кваліфіковано виконано, а розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує 4-5 %;

- теоретичні розрахунки виконано на ПЕОМ з похибкою $\sim 10^{-6}$, а дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики;
- значну частину експериментальних даних одержано різними незалежними методами.

Наукова новизна отриманих результатів

Основні наукові результати, які отримані автором особисто і які виносяться на захист, такі:

1. Вперше запропоновано науково обґрунтований метод визначення потенціалу енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму з урахуванням системного ефекту, що дає можливість більш повно визначати резерви економії електроенергії.

2. На основі вдосконаленого методу аналізу ієрархій вперше запропоновано наукові принципи вибору енергозберігаючих заходів у системах тягового електропостачання, що дозволяє системно підходити до їх вибору.

3. На основі структурного аналізу вперше запропоновано модель надійності системи електропостачання тяги поїздів постійного струму для задач керування режимами, яка дозволяє визначати величину сумарного параметру потоку відмов при здійсненні операцій з регулювання режимів.

4. Вперше запропоновано наукові підходи до визначення економічного збитку від можливих відмов при регулюванні режимів системи тягового електропостачання, що дозволяє комплексно підходити до питань регулювання режимів.

5. Вперше за допомогою адаптованого генетичного алгоритму отримано розв'язок комплексного завдання визначення раціональних режимів систем тягового електропостачання постійного струму, що забезпечує врахування змінних тарифів за спожиту електроенергію та економічного збитку від можливих відмов силового обладнання при регулюванні режимів.

6. Набув подальшого розвитку метод розрахунку систем тягового електропостачання на основі потоків відновлення, який на відміну від існуючого методу дозволяє визначати втрати потужності в елементах тягових підстанцій. Це надає можливість знаходити умови забезпечення раціональних режимів.

7. Набув подальшого розвитку метод визначення норм витрат електроенергії на потреби стаціонарних споживачів в частині побудови регресійних залежностей для визначення питомих норм, що дає можливість науково обґрунтовано планувати обсяги споживання електроенергії залізничними підприємствами.

Отримані в дисертаційній роботі результати з підвищення енергетичної і економічної ефективності систем електропостачання тяги поїздів постійного струму мають істотне значення для електрифікованих залізниць України.

Практична значимість отриманих результатів полягає в наступному:

1. Визначена величина потенціалу енергозбереження в системах тягового електропостачання постійного струму з урахуванням системного ефекту може бути використана для стимулювання енергозбереження в дистанціях електропостачання і для залучення інвестицій на енергозберігаючі заходи.

2. На основі запропонованого інваріантно-узгодженого методу аналізу

ієрархій сформовані наукові принципи вибору енергозберігаючих заходів. Отримано економічний ефект близько 3 млн грн на електрифікованій ділянці Донецької залізниці.

3. Створений програмний комплекс дозволяє визначати раціональні режими системи тягового електропостачання постійного струму з урахуванням змінних протягом доби тарифів на електроенергію та рівня надійності силового обладнання.

4. Застосування умов раціонального переведення на паралельну роботу силових трансформаторів, перетворювачів; раціональних рівнів напруг на шинах тягових підстанцій, отриманих на основі адаптованого генетичного алгоритму, дає можливість зменшити величину технологічних витрат електроенергії на покриття втрат в елементах системи електропостачання на 3-5 %.

5. Розроблено метод визначення норм витрат електроенергії на потреби стаціонарних споживачів, який враховує специфіку споживання електроенергії в різних господарствах залізничного транспорту. Це дає можливість більш точно планувати витрати електроенергії на розрахунковий період. Даний метод покладено в основу методичних рекомендацій ЦЕ-0015, затверджених Наказом Укрзалізниці № 545-Ц від 28.12.2006 р.

6. На основі розроблених наукових принципів визначення норм витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій постійного струму, постів секціонування й пунктів паралельного з'єднання розроблено Інструкцію з нормування витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій 6-220 кВ і розподільчих пунктів 6-10 кВ залізниць України ЦЕ-0018, що затверджена Наказом Укрзалізниці № 526-Ц від 08.11.2007 р.

7. Отримані результати дослідження впливу параметрів потоків поїздів на енергетичну ефективність систем тягового електропостачання дозволяють складати енергоефективні графіки руху поїздів для забезпечення мінімуму втрат електроенергії. За рахунок зазначеного заходу можна скоротити втрати в тяговій мережі на 3 – 4 % залежно від схеми живлення контактної мережі.

8. Розроблено рекомендації зі зменшення небалансів електроенергії в системах обліку електроенергії, які дозволяють, з одного боку, правильно враховувати небаланси у розрахунках втрат електроенергії, а з іншого – забезпечують виконання вимог під час розрахунків з ліцензіатами.

Результати дисертаційної роботи впроваджені на Донецькій, Львівській залізницях, в Головному управлінні електрифікації і електропостачання Укрзалізниці та в Інституті залізничного транспорту (при виконанні науково-дослідних робіт), м. Варшава, Польща. Основні теоретичні положення дисертації використовуються в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна для студентів п'ятого курсу спеціальності 7(8).05070103 «Електротехнічні системи електроспоживання» під час викладання курсу «Енергозбереження».

Особистий внесок здобувача

Автор разом з науковим консультантом сформулював мету, завдання досліджень. Основні наукові положення, результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У публікаціях, у яких відображені основні результати дисертації і які написані в

співавторстві, здобувачеві належать: [3] – постановка завдання, виконання розрахунків, статистичний аналіз питомих втрат електроенергії на розглянутій ділянці в пакеті Crystall Ball; [6] – визначення показників надійності; [9] – розробка методів визначення норм витрат електроенергії на власні потреби для постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання постійного струму; [10] – розробка методів визначення норм витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій постійного струму, що враховують специфіку тягового електропостачання; [11] – постановка задачі, складання структурно-логічної схеми для розрахунків показників надійності; [12, 38] – постановка задачі, виконання розрахунків; [13] – обробка експериментальних даних; [15] – статистичний аналіз показників транспортного потоку на обраній ділянці; [16, 48] – створення моделі для визначення впливу регулювання напруги на шинах тягових підстанцій на потенціал рейок; [17] – постановка експерименту, аналіз даних і розробка рекомендацій за пропуском здвоєних поїздів; [18] – постановка й вирішення завдання регулювання напруг на шинах тягових підстанцій Донецької залізниці з урахуванням надійності комутаційного обладнання і змінної вартості електроенергії; [19] – постановка задачі, виконання розрахунків; [21, 50, 52] – постановка задачі, керівництво проведенням експерименту, розробка рекомендацій зі зменшення небалансів електроенергії; [22] – постановка задачі, методологія визначення показників потоку поїздів, які обмежують пропускну здатність ділянки за умовами електропостачання; [23] – постановка задачі, залежність витрат електроенергії від коефіцієнта варіації міжпоїздного інтервалу; [24, 34, 58] – постановка задачі, аналіз умовних втрат електроенергії в контактній мережі; [25] – постановка задачі, розробка принципів формування узгоджених експертних оцінок, [26] – постановка задачі, аналіз впливу показників нерівномірності потоку поїздів на витрати електроенергії в контактній мережі, [27] – постановка задачі, розробка рекомендацій щодо зменшення втрат потужності в контактній мережі за рахунок зміни дислокації поїздів; [28] – методологічні підходи до визначення потенціалу енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів, класифікація потенціалу; [31] – постановка задачі, метод розрахунку раціональних режимів СТЕ на основі генетичного алгоритму; [32] – розділи 1-7; [33] – постановка задачі, методологічне забезпечення; [35, 55] – дослідження показників нерівномірності транспортного потоку, визначення потенціалу енергозбереження в системі тягового електропостачання за рахунок керування потоком поїздів; [40] – аналіз факторів, що впливають на довговічність опор контактної мережі; [44 – 46, 56, 57] – постановка задачі, виконання розрахунків; [47] – аналіз проблеми визначення втрат електроенергії в тяговій мережі; [49] – концепція енергозбереження в системах тягового електропостачання залізниць; [51] – розробка рекомендацій з енергозбереження на ділянках з гірським профілем; [59] – наукові принципи оцінювання ефективності енергоощадних заходів.

Роботи [1, 2, 4, 5, 7, 8, 14, 20, 29, 30, 36, 37, 39, 41 – 43, 53, 54] написані автором без співавторів.

Апробація результатів дисертації

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на 1-й Міжнародній науково-практичній конференції «Науковий потенціал світу –

2004», м. Дніпропетровськ, 2004; 66-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми й перспективи розвитку залізничного транспорту», м. Дніпропетровськ, 2006; 2-й Науково-практичній міжнародній конференції «Впровадження наукомістких технологій на магістральному й промисловому залізничному транспорті», м. Алушта, 2006; Міжнародній науковій конференції «Проблеми економіки транспорту», м. Дніпропетровськ, 2007; Міжнародній науково-практичній конференції «Транспортні зв'язки. Проблеми й перспективи», м. Дніпропетровськ, 2008; Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми й перспективи розвитку транспортного комплексу: освіта, наука, виробництво», м. Ростов-на-Дону, 2009; Міжнародній науковій конференції «Трансбалтика», Вільнюс, 2009; 1–5-й міжнародних науково-практичних конференціях «Електрифікація залізничного транспорту «Транселектро», смт Місхор; 2007–2011; 1, 2, 3-й міжнародних науково-практичних конференціях «Енергозбереження на залізничному транспорті», смт Воловець, 2010, 2011, 2012; 4, 5-й міжнародних науково-практичних конференціях «Електромагнітна сумісність і безпека на залізничному транспорті», смт Чинадієво, 2011, 2012; науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», м. Дніпропетровськ, 2011; 2-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС (ESS'11)», м. Свалява, 2011.

У повному обсязі дисертація доповідалася на:

- науковому семінарі кафедри «Електропостачання залізниць», березень 2012 р.;
- науковому семінарі в Інституті залізничного транспорту, м. Варшава, Польща, березень 2012 р.;
- міжкафедральному семінарі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, квітень 2012 р.

Публікації

Результати дисертаційної роботи опубліковані в 59 наукових працях, у тому числі: 1 монографія, 29 статей у фахових виданнях, 1 патент на корисну модель, 1 навчальний посібник, 3 статті у наукових журналах, 24 тези доповідей у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаної літератури й семи додатків. Основний текст роботи викладено на 301 сторінках. Дисертація містить 95 рисунків і 54 таблиці; таблиці й рисунки, розміщені на окремих сторінках, займають 15 сторінок. Повний обсяг дисертації 390 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, подано загальну характеристику роботи, доведено актуальність і зв'язок її з науковими програмами і темами, сформульовано мету і завдання дослідження, наведено основні наукові положення й результати досліджень, подано відомості про наукову новизну, практичну цінність роботи, показано особистий внесок здобувача й апробацію результатів дисертації.

У першому розділі розкрито проблему енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів (СТЕ) постійного струму. Розглянуто стан проблеми, визначено шляхи подальшого підвищення енергетичної і економічної ефективності систем електропостачання тяги поїздів постійного струму.

На розвиток залізничного транспорту в Україні вплинула низка негативних факторів, зокрема:

- прогресуюче старіння основних фондів;
- відсутність державної підтримки інноваційного розвитку галузі й недосконала законодавча база для залучення інвестицій;
- низький рівень тарифів на перевезення пасажирів і відсутність діючих механізмів компенсації збитків;
- випереджальне зростання цін на продукцію, яка споживається залізничним транспортом, порівняно з темпами зміни тарифів на перевезення.

Енергетична й економічна ефективність роботи СТЕ залізниць залежать від багатьох факторів, зокрема:

- типів електрорухомого складу,
- організації руху поїздів,
- режимів роботи пристроїв електропостачання.

Названі складові взаємозалежні й впливають одна на одну. Обсяг виконаної роботи на кожній залізниці характеризується виконанням вантажообігом і часом доставки вантажів. Перший показник залежить від кількості поїздів і їхньої маси. Характер зміни кількості поїздів, їх маси, міжпоїзного інтервалу, а також тип електрорухомого складу, профіль ділянки в сукупності впливають на характер навантаження тягових підстанцій. Час доставки вантажів визначає потребу в рухомому складі, а також кількості поїздів, які можуть одночасно перебувати на ділянці.

Економія електроенергії передбачає, насамперед, зменшення втрат електроенергії у всіх ланках СТЕ і в самих електроприймачах залізничного транспорту. Основними шляхами зниження втрат електроенергії на підприємствах залізничного транспорту є:

- 1) раціональна побудова системи електропостачання в ході її реконструкції;
- 2) зниження втрат електроенергії в діючих системах електропостачання за рахунок оптимізації режимів їх роботи;
- 3) нормування витрат електроенергії, розробка науково обґрунтованих норм питомих витрат електроенергії на одиницю продукції;
- 4) складання енергобалансів;

5) організаційно-технічні заходи, які розробляються конкретно на кожному залізничному підприємстві з урахуванням його специфіки.

Потрібно зауважити, що робота з енергозбереження і зниження витрат на електроенергію, яка виконувалася Укрзалізницею за весь час існування незалежної України, дозволила в умовах значного зростання тарифів на електроенергію протягом останніх років утримувати витрати на електроенергію в загальних витратах на перевезення практично на одному рівні. Обсяги економії електроенергії за рахунок впровадження енергозберігаючих заходів у господарстві електропостачання й електрифікації Укрзалізниці наведено в табл. 1.

Реалії сьогодення такі, що при виборі енергозберігаючих заходів необхідно звертати увагу не тільки на показники енергетичної ефективності систем електропостачання тяги. На перше місце за важливістю виходять показники економічної ефективності. Не даремно, на усіх без винятку залізницях України проведена плідна робота з впровадження закупівлі електроенергії з оптового ринку електроенергії (ОРЕ). За період 2001 – 2010 р. р. зафіксовано економію витрат за рахунок вибору раціонального варіанта оплати за спожиту електроенергію 620 459 тис. грн.

Необхідно наголосити, що незважаючи на значну роботу, яка виконана на шляху енергозбереження в системах тягового електропостачання, не всі резерви ще задіяні, і тому необхідно досліджувати цю проблему на системному рівні. Класифікація системи енергозберігаючих заходів представлена на рис. 1.

Таблиця 1 – Обсяги економії електроенергії за рахунок впровадження енергозберігаючих заходів в господарстві електропостачання

Заходи	Од. вим.	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Організаційно-технічні заходи	млн кВт·год	25,67	23,66	23,15	20,72	24,15	6,66	-	-	-	0,64
	млн грн	4,28	4,37	4,20	4,41	5,74	2,30	-	-	-	0,42
Програма енергозбереження	млн кВт·год	2,43	11,24	15,20	13,00	17,56	43,85	16,63	13,77	7,02	6,97
	млн грн	0,68	1,85	2,80	2,16	4,07	12,14	5,46	7,20	4,70	4,4
Усього	млн кВт·год	28,11	34,90	38,35	33,72	41,70	50,52	16,63	13,77	7,02	7,61
	млн грн	4,96	6,22	7,00	6,57	9,81	14,45	5,46	7,20	4,70	4,82

На сучасному етапі система електропостачання тяги поїздів потребує якісно нових підходів до впровадження енергоощадних заходів. Це пояснюється такими причинами:

- ринкові відносини в організації господарської діяльності залізничного транспорту вимагають прийняття рішень, спрямованих на максимізацію прибутку від перевезень;
- зниження показників надійності основного силового устаткування через зношування;
- лібералізація ринку електроенергії підштовхує до використання сучасних варіантів закупівлі електроенергії;

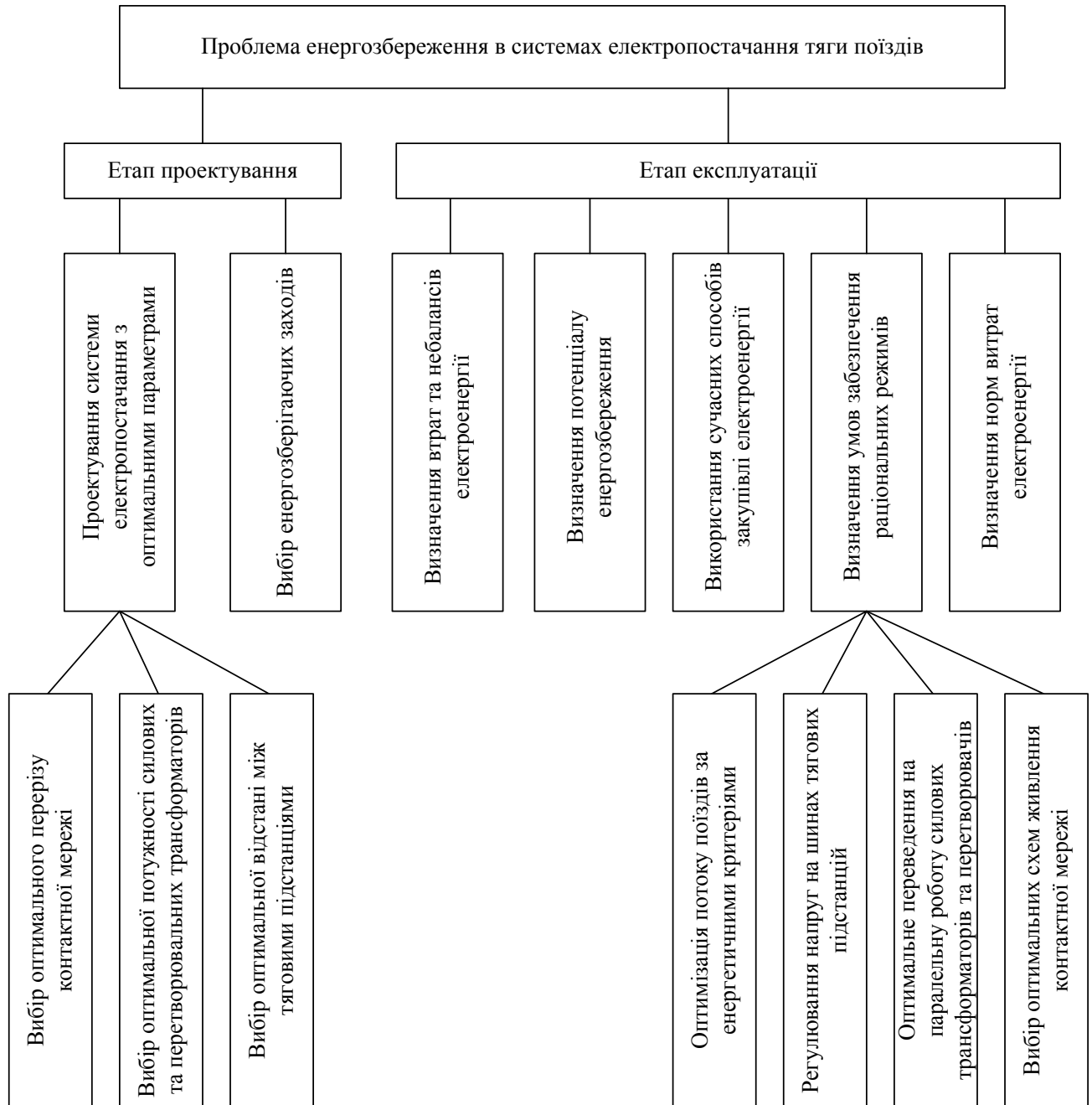


Рисунок 1 – Класифікація енергозберігаючих заходів в СТЕ тяги поїздів постійного струму

Досвід експлуатації систем електропостачання електротранспорту показує, що в нормальних режимах значення параметрів, які визначають умови надійності, якості, економічності передачі та споживання електроенергії, близькі до граничних. Тому обґрунтування енергоощадних заходів тільки з економічних міркувань буде недостатнім. На наш погляд, необхідно розширити кількість критеріїв і рішення приймати, спираючись на декілька критеріїв.

Ієрархія цілей, які можна технічно реалізувати в ході впровадження енергозберігаючої політики в системі тягового електропостачання, наведена на рис. 2.

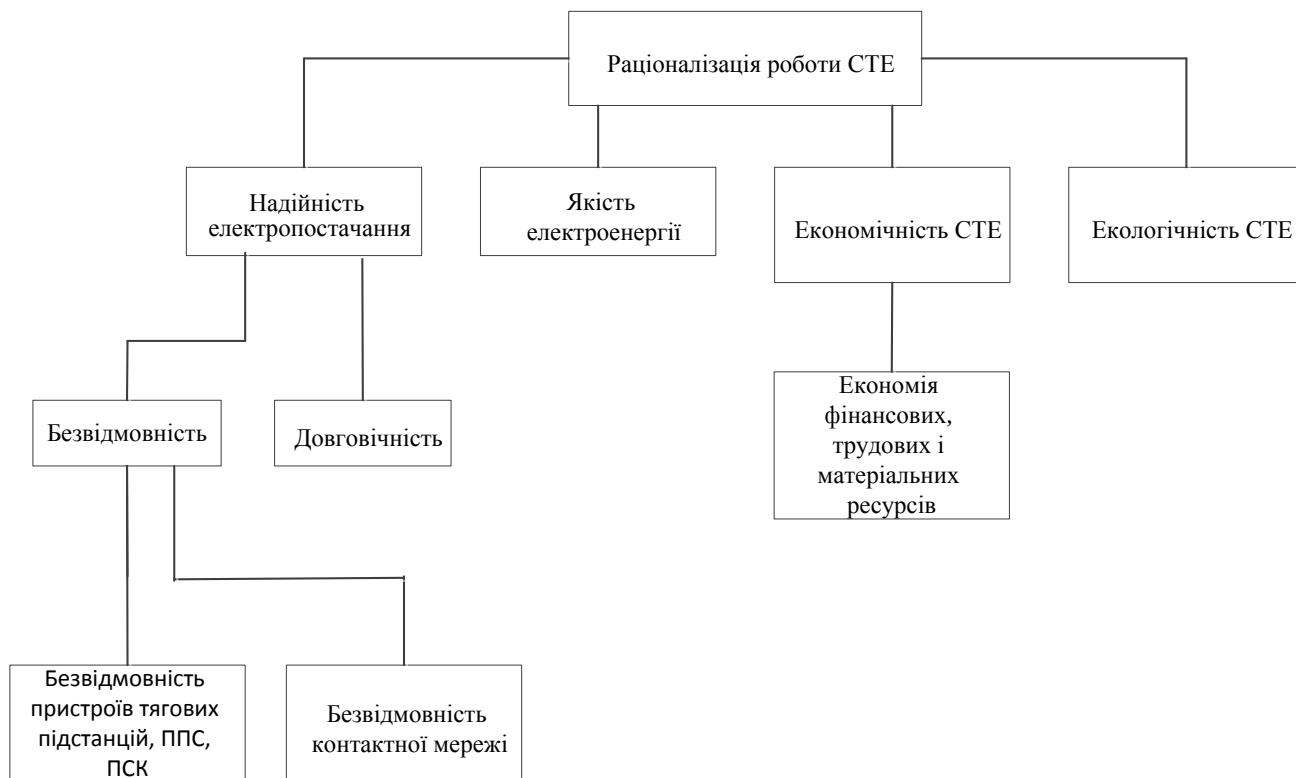


Рисунок 2 – Ієрархія цілей у ході впровадження енергозберігаючої політики в системах електропостачання

У *другому розділі* наведені запропоновані автором методологічні основи вибору енергоощадних заходів у системах електропостачання тяги поїздів постійного струму з урахуванням системного ефекту на основі модернізованого методу аналізу ієрархій.

Першим етапом розв'язання завдання вибору енергоощадних заходів є визначення технічного потенціалу енергозбереження, який можна знаходити як для окремого i -го енергозберігаючого заходу на k -му ($k \in K$) елементі (об'єкті) розглянутої виробничо-господарської системи, так і для різних множин таких заходів i , $i \in I$.

Цей потенціал може розраховуватися як в абсолютному вираженні (1), так і у відносних одиницях (2):

$$\Pi_{KI}^A = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[K_j \cdot (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) \cdot T_{k_i} \right], \quad (1)$$

$$\Pi_{KI}^O = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \left[K_j \cdot (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) \cdot T_{k_i} \right]}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} (K_j \cdot W_{k_i}^B \cdot T_{k_i})}, \quad (2)$$

де Π_{KI}^A , Π_{KI}^O – відповідно абсолютний і відносний потенціали енергозбереження;

$W_{k_i}^B, W_{k_i}^P$ – споживання паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР) відповідно до та після реалізації енергозберігаючого заходу в умовних одиницях виміру (якщо розглядається економія більше одного виду ПЕР). Якщо розглядається тільки один вид ПЕР, то в цьому випадку потенціал може розраховуватися в натуральних одиницях;

j – індекс виду ПЕР, $j \in J$;

K_j – коефіцієнт переведення натуральних одиниць виміру в умовні;

T_{k_i} – період часу, для якого розраховується зниження витрат ПЕР для відповідного енергозберігаючого заходу.

Для ідентифікації потенціалу енергозбереження систем електропостачання тяги поїздів залізниць запропоновано використовувати набір кваліфікаційних ознак, наведений у табл. 2.

Таблиця 2 – Класифікаційні ознаки потенціалу енергозбереження на залізничному транспорті

Класифікаційна ознака	Класифікація				
Елементи (об'єкти) досліджуваної системи	Система електропостачання тяги поїздів у цілому	Дистанції електропостачання	Цехи, ділянки, тягові підстанції, райони контактної мережі	Технологічні процеси	Установки, устаткування машини і т.д.
Вид потенціалу енергозбереження	Теоретичний	Технічно досяжний		Економічно доцільний	
Тип енергозберігаючого заходу	Організаційно-технологічний			Інвестиційний	
Вид ПЕР	ПЕР у цілому	Група ПЕР		Конкретний вид ПЕР	
Одиниці виміру	Натуральні	Умовні		Вартісні	Відносні
Часовий інтервал розрахунків	Життєвий цикл енергозберігаючого заходу			Визначений період життєвого циклу (рік, місяць і т.д.)	
Рівень реалізації	Прогнозний	Плановий		Фактичний	

Освоюючи потенціал енергозбереження, у першу чергу доцільно реалізовувати організаційно-технологічні енергоощадні заходи, які не потребують значних витрат. Одним з таких заходів є впровадження технічно доступного потенціалу зниження витрат для систем електропостачання тяги поїздів постійного струму за рахунок погодженої оптимізації графіка руху поїздів і схем їх електроживлення.

Особливістю цього потенціалу є те, що він залежить від параметрів потоку поїздів:

$$\Pi_{KI}^E = F(k_i, N^{opt}) - F(k_i, N^{fact}), \quad (3)$$

де k_i – коефіцієнт інтенсивності руху поїздів, що впливає на завантаження устаткування підстанцій, нерівномірність навантаження по коліях і т.д.;

N^{opt}, N^{fact} – оптимальна та фактична схеми електроживлення відповідно.

Таким чином, цей потенціал може суттєво змінюватись в часі, тобто є динамічним, що зумовлено специфікою живлення тяги поїздів. Поряд із цим,

специфічним для існуючих систем електропостачання є наявність системного ефекту. Впровадження енергоощадних заходів на нижчих класах напруги викликає додаткове зниження втрат електроенергії на більш високих класах напруги – у живильних лініях електропередач і трансформаторах. Величина цього додаткового ефекту буде визначатися характеристиками елементів, що входять до системи електропостачання, а також усіма зв'язками між ними. При цьому потенціал енергозбереження системи електропостачання представляє собою сукупність потенціалів енергозбереження складових елементів і може бути розрахований як сума значень потенціалів окремих елементів.

Так, потенціал енергозбереження дистанції електропостачання (ЕЧ) може бути визначений за таким виразом:

$$P_{\text{ел}}^{\text{ЕЧ}} = \sum_{i=1}^{n_1} P_{\text{ЕЧ}ci} + \sum_{j=1}^{n_2} P_{\text{СЦБ}j} + \sum_{l=1}^{n_3} P_{\text{КМ}l} + \sum_{i=1}^{n_4} P_{\text{ТП}k} + P_{\text{ВН}}, \quad (4)$$

де $P_{\text{ел}}^{\text{ЕЧ}}$ – потенціал енергозбереження ЕЧ;

$P_{\text{ВН}}$ – потенціал енергозбереження в зовнішній системі електропостачання (системний ефект);

$P_{\text{ЕЧ}ci}$ – потенціал енергозбереження i -го району електричних мереж (ЕЧС);

$P_{\text{СЦБ}j}$ – потенціал енергозбереження j -ї ділянки мереж електропостачання СЦБ (сигналізація, централізація й блокування);

$P_{\text{КМ}l}$ – потенціал енергозбереження l -ї ділянки контактної мережі (КМ);

$P_{\text{ТП}i}$ – потенціал енергозбереження k -ї тягової підстанції (ТП);

n_1, n_2, n_3, n_4 – кількість районів ЕЧС, ділянок живлення пристроїв СЦБ, ділянок контактної мережі та тягових підстанцій відповідно, які структурно входять у розглянуту дистанцію електропостачання.

Визначення $P_{\text{ВН}}$ базується на використанні нормативних коефіцієнтів втрат у зовнішній системі електропостачання і виконується в рамках двоетапної процедури. На першому етапі знаходять потенціал енергозбереження тільки від заходів на залізниці $P_{\text{ЖД}}$, який обчислюють з модифікованого виразу (4), у якому відсутній останній доданок. На другому етапі визначається $P_{\text{ВН}}$ з виразу

$$P_{\text{ВН}} = K_{\text{ВН}} \cdot P_{\text{ЖД}}, \quad (5)$$

де $K_{\text{ВН}}$ – нормативний усереднений коефіцієнт втрат у живильних лініях і трансформаторах системи зовнішнього електропостачання.

Для зручного розрахунку ефекту від впровадження енергоощадних заходів запропоновано графову модель.

Як показник ефективності енергоощадних заходів запропоновано такий вираз:

$$C = \left[\sum_{m=1}^T C_e(t_m) t_m \left(\sum_{i=1}^{N-1} (\Delta P_{Ti} + \Delta P_{yi}) + \sum_{i=1}^N \Delta P_{\Pi i} \right) + Y \right], \quad (6)$$

де $C_e(t)$ – вартість електроенергії;

ΔP_{Ti} – втрати потужності в тяговій мережі i -ї зони без урахування зрівняльних струмів;

ΔP_{yi} – втрати потужності в тяговій мережі i -ї зони, спричинені нерівністю електрорушійних сил (ЕРС) підстанцій;

ΔP_{Pi} – втрати потужності в обладнанні i -ї тягової підстанції;

U – збиток, який враховує ненадійність трансформаторів і комутаційних пристроїв;

T – період часу, за який визначаються затрати;

t_m – m -й інтервал часу;

N – кількість тягових підстанцій на зоні.

У господарстві електропостачання може бути сформована множина M енергоощадних заходів, що можуть бути впроваджені. За наявності економічних обмежень відповідно до ієрархії цілей необхідно обрати найбільш ефективні заходи. Для цього в дисертації запропонований модернізований (інваріантно-погоджений) метод аналізу ієрархій (ІП МАІ). У ньому використана така методика побудови матриць переваг, яка на кожному кроці інваріантно забезпечує погодженість за допустимим рівнем індексу погодженості.

ІП МАІ базується на експертних оцінках енергозберігаючих заходів. Робота експерта повинна виконуватися в програмному середовищі, що забезпечує можливість одночасного доступу до графічного елемента управління та двох представлень матриці переваг.

На рис. 3 наведений елемент управління для трьох альтернатив. Допустимі переміщення відповідають погодженим матрицям переваг. Згідно із заданими користувачами співвідношеннями формуються матриці переваг у числовому і семантичному представленні.

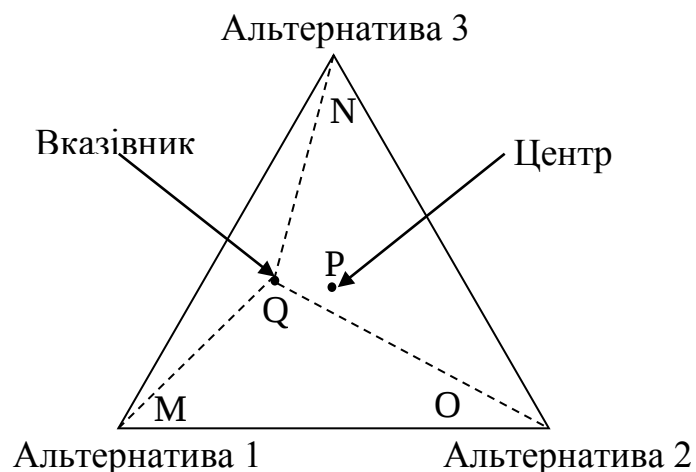


Рисунок 3 – Елементи інтерфейсу користувача для порівняння альтернатив

Кожному можливому заповненню матриці переваг відповідає допустима точка на елементі управління, у якій мінімізується непогодженість переваг. Для кожного елемента розраховується :

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left(a_{ij} - \frac{s_{ij} - r_i}{s_{ij} - r_j} \right)^2, \quad (7)$$

де F – функція невідповідності точки на елементі управління значенням матриці переваг, s_{ij} – відстань між вершинами, що відповідають альтернативам i і j , r_i – відстань між вершиною, що відповідає альтернативі i і вказівною точкою.

У третьому розділі наведено моделі елементів системи енергозбереження в СТЕ. Надана інформація про моделі тарифів на електроенергію, що використовуються на залізницях для розрахунків за електроенергію. Описана модель збитків від ненадійності силового обладнання при регулюванні режимів СТЕ.

Для урахування надійності системи тягового електропостачання в завданнях регулювання режимів складена модель надійності на основі структурно-логічної схеми. У цій схемі враховуємо лише ті елементи, які беруть участь у процесі регулювання режимів системи електропостачання, інші елементи вважаємо абсолютно надійними (рис. 4). У даній схемі елементи 1,2,5 – це високовольтні вимикачі змінного струму, елементи 3,4 – пристрої регулювання напруги під навантаженням (РПН) знижувальних трансформаторів, елементи 6,7 – вимикачі змінного струму, 8,9 – пристрої РПН перетворювальних трансформаторів, елементи 10,11 – швидкодіючі вимикачі постійного струму, елемент 12 являє собою систему телемеханіки. Елементи 13 і 15 – пункт паралельного з'єднання (ППС), елемент 14 – пост секціонування (ПСК). Схема, наведена на рис. 4, стосується складних структурно-логічних схем і може бути зведена шляхом перетворень до еквівалентної мостової схеми. Розрахувати показники надійності мостової схеми можна, скориставшись методом розкладання щодо особливого елемента.

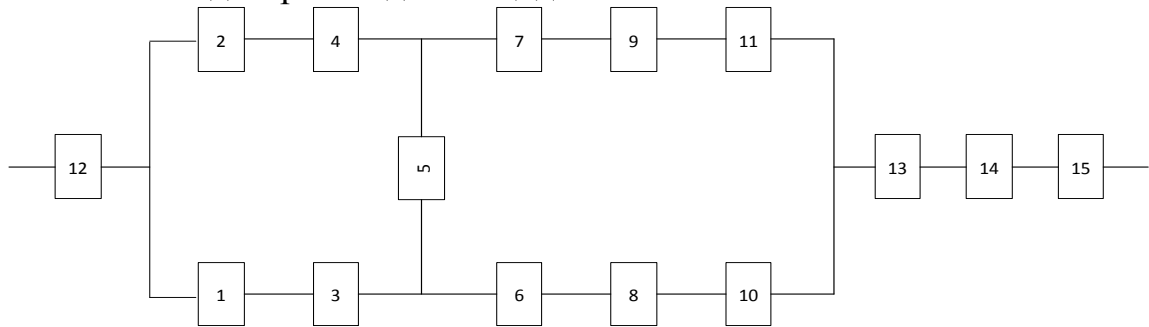


Рисунок 4 – Структурно-логічна схема надійності СТЕ постійного струму при регулюванні режимів

Загальний збиток від ненадійності силових пристроїв СТЕ, що беруть участь у регулюванні режимів, запропоновано розраховувати за таким виразом

$$Y = Y_U + Y_{\text{ПТ}} + Y_{\text{ТТ}} + Y_{\text{КС}}, \quad (8)$$

Y_U – складова збитку, викликана ненадійністю силового устаткування, задіяного в регулюванні напруги на шинах тягових підстанцій;

$Y_{\text{ПТ}}$ – складова збитку, викликана ненадійністю силового устаткування, задіяного в перемиканні знижувальних трансформаторів на паралельну роботу;

$U_{\text{тг}}$ – складова збитку, викликана ненадійністю силового устаткування, задіяного в перемиканні перетворювальних агрегатів тягових підстанцій на паралельну роботу;

$U_{\text{кв}}$ – складова збитку, викликана ненадійністю силового устаткування, задіяного в перемиканні схем живлення контактної мережі.

Для врахування економічного збитку від можливих відмов під час регулювання режимів СТЕ необхідно насамперед описати всі можливі ситуації, які можуть виникнути при регулюванні (рис. 4), визначити ступінь ризику, прорахувати вартість операцій з ліквідації відмов, вартість зупинки або простою поїздів (для відмов, пов'язаних з фактами простою або зупинки поїздів). Характеристики можливих ситуацій, що виникають під час регулювання режимів СТЕ, наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Параметри надійності ситуацій, пов'язаних з регулюванням режимів СТЕ

Ситуація	Опис розглянутої ситуації	Сумарний параметр потоку відмов ω , 1/перекл.	Вартість операції з відновлення ресурсу (заміни), грн.
Перемикання знижувальних трансформаторів на паралельну роботу (або у зворотному напрямку)	Відновлення (ремонт) вимикача змінного струму	0,008	2 400
Перемикання перетворювальних трансформаторів на паралельну роботу	Відновлення (ремонт) вимикача змінного струму або швидкодіючого вимикача постійного струму	0,029	2 400
Регулювання напруги на шинах тягової підстанції при однострансформаторній схемі	Відновлення (ремонт) пристроїв РПН	$5,71 \cdot 10^{-5}$	30 000
Регулювання напруги на шинах тягової підстанції при двотрансформаторній схемі	Відновлення (ремонт) пристроїв РПН, введення в роботу резервного живлення	Не є постійною величиною. Може бути розрахований за формулою $\omega = \frac{Q'(t)}{P(t)}$	Вартість операції розраховується з урахуванням можливої затримки поїздів або припинення руху
Перемикання зі схеми двостороннього живлення на схему паралельного живлення (і назад)	Відновлення (ремонт) вимикачів постійного струму на ППС або ПСК	0,2	9 600
Перемикання зі схеми вузлового живлення на схему паралельного живлення (і назад)	Відновлення (ремонт) вимикачів постійного струму на ППС або ПСК	0,1	4 800
Перемикання зі схеми двостороннього живлення на схему вузлового живлення	Відновлення (ремонт) вимикачів постійного струму на ППС або ПСК	0,1	4 800

Збиток від ненадійності обладнання під час регулювання режимів запропоновано розраховувати як добуток імовірності відмови при здійсненні елементарної операції з регулювання на середню вартість операції з відновлення ресурсу (заміни) силового обладнання. Такі дані можуть бути отримані з калькуляцій робіт в дистанціях електропостачання.

У четвертому розділі описано вдосконалений метод розрахунку систем тягового електропостачання, заснований на представленні потоку поїздів як потоку

відновлення, який використовується при регулюванні режимів СТЕ. Приведено вдосконалений метод визначення коефіцієнтів втрат потужності для задач виміру втрат електроенергії в контактній мережі. Прийнятий в дисертації показник ефективності енергоощадних заходів (6) містить втрати електроенергії в тяговій мережі, в елементах тягових підстанцій. Для визначення втрат електроенергії в тяговій мережі прийнятий за основу метод розрахунків СТЕ Е. С. Почаєвця. Цей метод був доповнений розрахунковими виразами для визначення втрат потужності в елементах тягових підстанцій з урахуванням регулювання режимів.

Обраний метод розрахунку СТЕ базується на представленні потоку поїздів як потоку відновлення. Міжпоїзний інтервал є випадковою величиною, яка добре описується логарифмічно-нормальним розподілом імовірностей. Щільність імовірностей цього розподілу $f(l)$ пов'язана з інтенсивністю потоку $\lambda(l)$ інтегральним рівнянням Вольтерра 2-го роду

$$\lambda(l) = f(l) + \int_0^l \lambda(s) f(l-s) ds. \quad (9)$$

Розглянемо одноколіїну ділянку постійного струму. Розіб'ємо її на M елементарних відрізків Δl_i . Тоді миттєве значення струму в розрахунковому перерізі може бути записане у вигляді суми двох складових

$$i_s = i_{es} + i_{ns}, \quad (10)$$

де

$$i_{es} = \sum_{i=1}^M \psi_{si} \cdot i_i \cdot \gamma_i; \quad i_{ns} = \sum_{j=1}^n g_{sj} \cdot e_{Kj}.$$

Перша складова i_{es} відображає вплив струмів поїздів на значення струмів у розрахунковому перетині тягової мережі, друга складова i_{ns} – вплив нерівності напруг на шинах тягових підстанцій на розподіл струмів у перетинах тягової мережі; ψ_{si} – значення функції струморозподілу (ФТР) перетину S при розташуванні поїзда на i -му відрізку Δl_i ; i_i – миттєве значення струму поїзда на цьому відрізку; e_{Kj} – миттєве значення контурної ЕРС j -го контуру; g_{sj} – елементи S -го рядка матриці опорів – R_{11}^{-1} , γ_i – дискретна випадкова величина, яка набуває таких можливих значень: 0 – за відсутності поїзда на ділянці; 1 – за наявності поїзда.

Перший доданок може бути розрахований з такого виразу:

$$\bar{i}_{es} = \int_{l_H}^{l_K} \psi_s(l) \cdot i(l) \cdot \lambda(l) dl, \quad (11)$$

де l_H – координата початку елемента електрифікованої ділянки;

l_K – координата кінця елемента електрифікованої ділянки.

Середні втрати потужності в тяговій мережі від навантажень поїздів виразимо інтегралом від епюри середнього квадрату струму на розрахунковій ділянці

$$\Delta \bar{p} = \int_{l_H}^{l_K} \bar{i}_e^2(s) \cdot r_0(s) ds.$$

Загальні втрати активної потужності в устаткуванні тягової підстанції постійного струму визначаються за таким виразом:

$$\Delta P_{ТП} = \Delta P_{ГПТ} + \Delta P_{ПТ} + \Delta P_B + \Delta P_{СФ} + \Delta P_{СН}, \quad (12)$$

де $\Delta P_{ГПТ}$ – втрати в знижувальному трансформаторі (ГПТ);

$\Delta P_{ПТ}$ – втрати в тяговому трансформаторі (ПТ);

ΔP_B – втрати у випрямному агрегаті;

$\Delta P_{СФ}$ – втрати у згладжуючому фільтрі (СФ);

$\Delta P_{СН}$ – втрати на власні потреби тягової підстанції (СН).

Складова втрат на власні потреби тягової підстанції $\Delta P_{СН}$ може бути визначена з інструкції ЦЕ-018, яка розроблена автором дисертації. Розглянемо складову втрат $\Delta P_{ГПТ} + \Delta P_{ПТ}$. Як відомо, втрати в трансформаторах складаються із втрат холостого ходу й втрат короткого замикання:

$$\Delta P_{ХХ} = X_1 \cdot \Delta P_{ХХПТ} + X_2 \cdot \Delta P_{ХХТТ}, \quad (13)$$

де X_1 й X_2 – кількість одночасна працюючих ГПТ і ПТ відповідно,

$\Delta P_{ХХГПТ}$ і $\Delta P_{ХХПТ}$ – втрати холостого ходу ГПТ і ПТ відповідно.

Втрати короткого замикання в ГПТ і ПТ можуть бути обчислені за таким виразом:

$$\Delta P_{КЗ} = \Delta P_{КЗПТ} + \Delta P_{КЗГПТ} \cdot \left(\frac{I_{НОМПТ}}{I_{НОМГПТ}} \right)^2, \quad (14)$$

де $\Delta P_{КЗПТ}$ й $\Delta P_{КЗГПТ}$ – втрати короткого замикання тягового й знижувального трансформатору відповідно;

$I_{НОМПТ}$ і $I_{НОМГПТ}$ – номінальні струми ПТ і ГПТ відповідно.

Тоді втрати потужності в трансформаторах ГПТ і ПТ визначаються як

$$\Delta P_T = \Delta P_{ХХ} + X_1 \cdot \Delta P_{КЗГПТ} \cdot \left(\frac{I_{НОМПТ}}{I_{НОМГПТ}} \right)^2 \cdot \left(\frac{\kappa_3}{X_1} \right)^2 + X_2 \cdot \Delta P_{КЗПТ} \cdot \left(\frac{\kappa_3}{X_2} \right)^2, \quad (15)$$

де $\kappa_3 = \frac{I_d}{I_{d\text{ном}}}$ – коефіцієнт завантаження перетворювача.

Коефіцієнти завантаження перетворювачів можуть бути розраховані за відомим середнім струмом в перерізі S тягової мережі (якщо підставити координату підстанції у вираз (10)).

У (15) врахований той очевидний факт, що втрати потужності у випадку паралельної роботи агрегатів із сумарним навантаженням I_d дорівнюють значенню

втратах в одному агрегаті при навантаженні $I_{\text{п}} / X_2$, помноженому на кількість паралельно працюючих агрегатів, тобто в нашому випадку – X_2 .

У *п'ятому розділі* розглядаються теоретичні аспекти забезпечення раціональних режимів СТЕ. Приводиться розроблений автором метод енергозбереження в СТЕ шляхом оптимізації режимів на основі адаптованого генетичного алгоритму (ГА). Описана методологічна база енергооптимальної організації руху поїздів. Досліджено вплив нерівномірності потоків поїздів на втрати електроенергії в тяговій мережі. Складено регресійні залежності втрат електроенергії в тяговій мережі від коефіцієнта варіації міжпоїздного інтервалу.

Для виконання розрахунків необхідно змодельовати ділянку тягової мережі (ввести інформацію про кількість підстанцій на ділянці, їх розташування, типи обладнання на підстанціях, кількість колій і вузлів на зонах, схеми підключення колій до вузлів і т.д.) і сформувати нормативно-довідкову інформацію про характеристики поїздів, електровозів, тягових та знижувальних трансформаторів, перетворювальних агрегатів, згладжувальних фільтрів. Для обраної ділянки визначається кількість підстанцій, міжпідстанційних зон, а також кількість вузлів на кожній міжпідстанційній зоні й можливі рівні напруг на шинах підстанцій.

Для кожної j -ї зони фіксується час входу t_1 i -го поїзда в зону і час його виходу із зони t_2 в інтервалі часу k . Тоді для j -ї зони в k -й проміжок часу інтенсивність потоку поїздів λ_{jk} буде мати вигляд:

$$\lambda_{jk} = \sum_i (t_{2i} - t_{1i}) / 60. \quad (16)$$

На основі отриманих даних розраховується довжина хромосом особин, з якими працює генетичний алгоритм. У хромосомі для кожної підстанції і міжпідстанційної зони виділяється певна кількість генів (рис. 5).

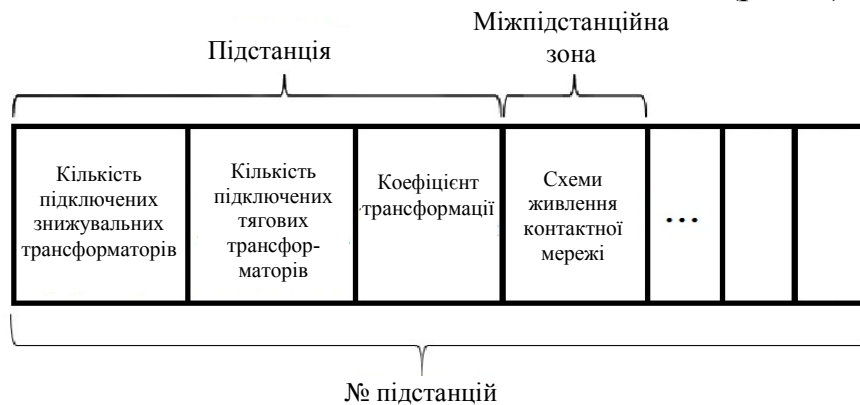


Рисунок 5 – Представлення хромосоми

Визначившись із довжиною хромосом, виконується формування початкової популяції. Хромосоми кожної особини заповнюються випадково.

Особини оцінюються мірою пристосованості (6). Із заданою ймовірністю відбувається кросинговер – обмін генами між батьківськими парами. Для розробленого генетичного алгоритму був обраний багатоточковий кросинговер (рис. 6). Критерієм закінчення процесу формування нових поколінь популяції є відсутність поліпшень протягом п'яти поколінь або перевищення заданої кількості ітерацій (кількості формування нових поколінь).

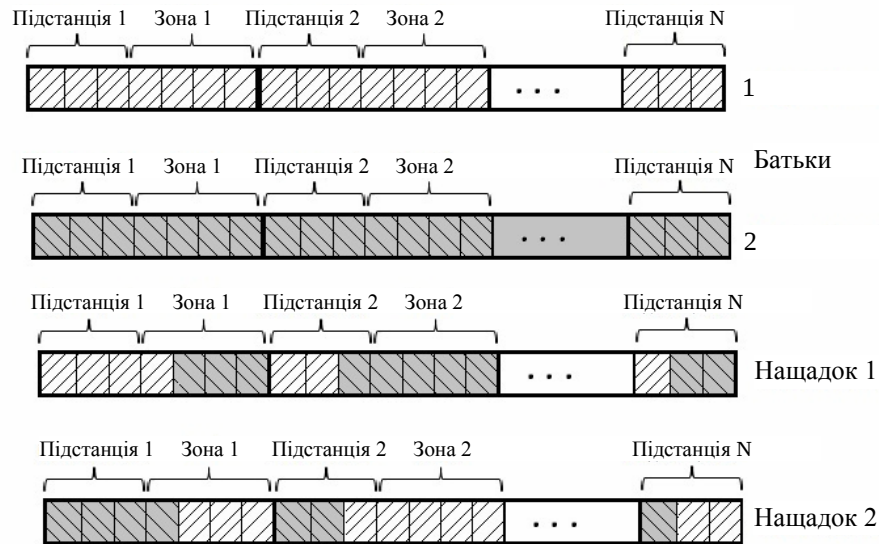


Рисунок 6 – Процес кросинговеру з точками розрізу 4, 2, ..., 1

Дослідження залежності величини втрат потужності в тяговій мережі від дислокації поїздів і відстані між поїздами на ділянці показали, що є істотний резерв зниження втрат у контактній мережі за рахунок добору раціональної дислокації поїздів. Так, варіація втрат потужності залежно від дислокації і відстані між поїздами досягає 3,5 рази на міжпідстанційній зоні (МЗ) Н.Д.- Вузол – Іларіонове і майже 10 раз на МЗ Письменна – Роздори.

Розрахунки втрат потужності в тяговій мережі виконувалися в парному напрямку для МЗ Н.Д.- Вузол – Іларіонове, у непарному – для МЗ Письменна – Роздори, де наявний підйом профілю колії, і дані МЗ можна розглядати як «вузьке місце» усього напрямку, що лімітує пропускну здатність ділянки Н.Д.- Вузол – Чаплине за умовами електропостачання. Результати розрахунків наведені в табл. 4.

За наведеним даними мінімальні втрати для двох поїздів на МЗ Н.Д.- Вузол – Іларіонове становлять 918 кВт, а максимальні 4 136 кВт, на МЗ Письменна – Роздори мінімальні втрати для двох поїздів 1 310 кВт, максимальні – 14 175 кВт.

Також у цьому розділі наведено результати експериментального дослідження режимів СТЕ у разі пропуску здвоєних поїздів на Павлоградській дистанції електропостачання Придніпровської залізниці. У результаті дослідження режимів напруги на Придніпровській залізниці при проходженні здвоєних вантажних поїздів масою 10 000÷12 000 т встановлено, що напруга в контактній мережі всередині фідерної зони знижувалася до 2,2 ÷ 2,4 кВ, що нижче існуючих норм. При проходженні вантажних поїздів на цій фідерній зоні масою 5 000 т і більше з інтервалом руху 15 хв напруга в контактній мережі усередині фідерної зони знижувалася до 2,5 кВ, що також нижче встановлених норм. У цьому випадку регулювання режимів СТЕ неможливе, доцільно встановити комплектну одноагрегатну тягову підстанцію. Запропоновано для часткового підняття напруги всередині фідерної зони перемкнути анцапфи тягових трансформаторів з першого положення в друге. Для запобігання відпалу контактних проводів на ділянці запропоновано відкоригувати інтервали руху поїздів відповідно до обмежень системи тягового електропостачання.

Таблиця 4 – Втрати потужності в тяговій мережі для трьох поїздів на МЗ Письменна – Роздори

Відстань між поїздами, км	Дислокація поїздів, км			Миттєве значення струму поїзда, А			Миттєві сумарні втрати потужності в тяговій мережі при даному розташуванні поїздів, кВт
	1-й поїзд	2-й поїзд	3-й поїзд	1-й поїзд	2-й поїзд	3-й поїзд	
3	0,1	3,1	6,1	39	513	1565	3799
	2,1	5,1	8,1	423	1768	1880	13043
	4,1	7,1	10,1	1769	1724	1635	21100
	6,1	9,1	12,1	1565	1921	1706	23917
	8,1	11,1	14,1	1880	1775	0	14175
4	0,1	4,1	8,1	39	1769	1880	10451
	2,1	6,1	10,1	423	1565	1635	9339
	4,1	8,1	12,1	1769	1880	1706	20488
	6,1	10,1	14,1	1565	1635	0	8712
	8,1	12,1	16,1	1880	1706	0	12108
5	0,1	5,1	10,1	39	1768	1635	8423
	2,1	7,1	12,1	423	1724	1706	10542
	4,1	9,1	14,1	1769	1921	0	10038
	6,1	11,1	16,1	1565	1775	0	8201

У шостому розділі представлено результати впровадження наукових положень дисертаційної роботи. Показано вирішення завдання оптимізації витрат залізниці при закупці електроенергії із застосуванням ІІ МАІ. Описано технологію визначення норм витрат електроенергії для стаціонарних споживачів і на власні потреби тягових підстанцій, постів секціонування й пунктів паралельного з'єднання. Складено регресійні залежності для визначення питомих норм електроенергії на потреби стаціонарних споживачів залізниць України. Подано рекомендації щодо зниження наднормативних небалансів електроенергії в СТЕ. Також описано створений прикладний програмний комплекс з розрахунку умов раціональних режимів СТЕ постійного струму.

В результаті використання ІІ МАІ для СТЕ Донецької залізниці розроблені рекомендації щодо оптимізації витрат при закупці електроенергії. На тяговій підстанції ТП-Донецьк здійснювалася трансформація напруги за схемою 35/6/3,3 кВ. У зв'язку з підготовкою до Євро-2012 виникла необхідність розвитку привокзального комплексу та збільшення потужності підстанції.

На основі інваріантно-погодженого методу аналізу ієрархій найбільш ефективними виявились наступні альтернативи:

1) застосування старої схеми трансформації 35/6/3,3 кВ на тягу поїздів зі збільшенням потужності знижувальних трансформаторів 35/6 кВ. Трансформатор ТД-16000/35/6 кВ можна замінити на трансформатор ТД-25000/35/6 кВ;

2) перехід на нову схему трансформації 35/3,3 кВ.

Виходячи з того, що межею реалізації електроенергії на тягу поїздів визначені перетворювальні трансформатори на тягових підстанціях, то перехід на нову схему трансформації 35/3,3 кВ дозволив здійснювати закупівлю електроенергії за тарифом 1-го класу, а не 2-го класу, як при старій схемі трансформації 35/6/3,3 кВ. У табл. 5

наведено розрахунки економії коштів в умовах переходу на постачання електроенергії по 1-му класу для потреб електротяги.

Таблиця 5 – Розрахунки економії коштів в умовах переходу на постачання електроенергії 1-го класу для потреб електротяги поїздів на ТП-Донецьк за роздрібними тарифами і обсягами електроенергії за 2009 р.

Місяць	Обсяг реалізації, кВт·год	Тариф 2-го класу, грн./кВт·год	Вартість електроенергії за 2-м класом, тис. грн	Тариф 1-го класу, грн./кВт·год	Вартість електроенергії за 1-м класом, тис. грн	Різниця, тис. грн
Січень	1206453	0,5846	705,29	0,4359	525,89	179,40
Лютий	1221600	0,5846	714,15	0,4359	532,50	181,65
Березень	1453680	0,5846	849,82	0,4359	633,66	216,16
Квітень	1419720	0,5846	829,97	0,4359	618,86	211,11
Травень	1923720	0,5846	1124,61	0,4359	838,55	286,06
Червень	1828800	0,5846	1069,12	0,4359	797,17	271,94
Липень	1831920	0,5846	1070,94	0,4359	798,53	272,41
Серпень	2110440	0,5846	1233,76	0,4359	919,94	313,82
Вересень	2136720	0,5846	1249,13	0,4359	931,40	317,73
Жовтень	1951601	0,5846	1140,91	0,4359	850,70	290,20
Листопад	1531879	0,6068	929,54	0,4572	700,38	229,17
Грудень	1787400	0,613	1095,68	0,4617	825,24	270,43
Усього	20403933		12012,91		8972,82	3040,09

Запропоновано також принципи нормування витрат електроенергії для стаціонарних споживачів:

- розрахунки норм витрати електроенергії за укрупненими показниками;
- врахування характеру сезонності роботи стаціонарних споживачів;
- врахування кліматичних умов роботи залізниць;
- врахування енергетичної оснащеності підприємств залізничного транспорту;
- врахування обсягів перевізної роботи залізницями;
- врахування потенційного рівня науково-технічного прогресу.

У дисертації запропоновано враховувати сезонність роботи стаціонарних споживачів залізничного транспорту за допомогою коефіцієнта сезонності. Числове значення коефіцієнта сезонності будемо визначати за такою формулою:

$$k_c = \frac{W_i}{W_{cp}}, \quad (17)$$

де W_i – обсяг споживання електроенергії на потреби стаціонарних споживачів в i - му місяці,

W_{cp} – середньорічний обсяг споживання електроенергії стаціонарними споживачами.

Як приклад на рис. 7 наведено характер коефіцієнта сезонності для стаціонарних споживачів служб перевезень Укрзалізниці.

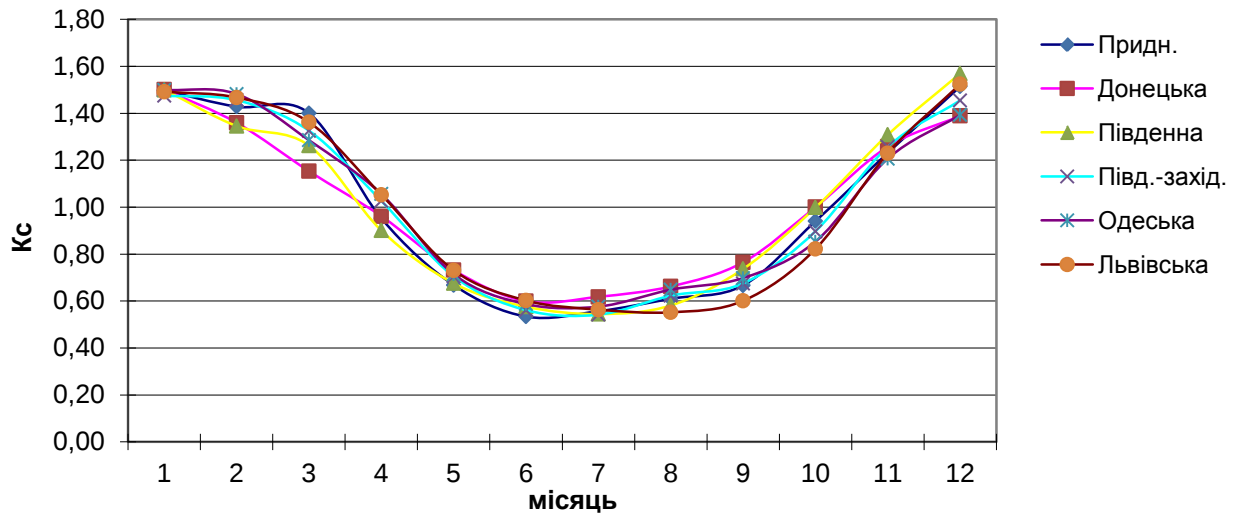


Рисунок 7 – Коефіцієнти сезонності для служб перевезень Укрзалізниці

У дисертації складені регресійні рівняння, що пов'язують перевізну роботу залізниць і норму споживання електроенергії для стаціонарних споживачів у такому вигляді, кВт·год / 10^4 т·км брутто,

$$\omega_d = k_{md} k_{cd} k_{zd} \left(A_d - B_d \cdot n_{dp} \right) = \frac{\sum_{j=1}^{n_c} W_{cj}}{n_{dp}}, \quad (18)$$

де k_{md} – коефіцієнт, який враховує вплив рівня технічної оснащеності всіх об'єктів, які входять до складу залізниці, на зміну питомої витрати електроенергії;

k_{cd} – коефіцієнт сезонності;

k_{zd} – коефіцієнт, який враховує вплив температури зовнішнього повітря на зміни питомої витрати електроенергії;

A_d і B_d – коефіцієнти, які відповідають конкретній залізниці.

У результаті обробки масиву експериментальних даних про витрати електроенергії стаціонарними споживачами за 2000–2005 р. р. за звітними формами ЕО-1 були отримані такі значення коефіцієнтів рівняння регресії для залізниць в цілому (табл. 6).

Аналогічні рівняння регресії складені для всіх служб залізниць України. Описані методи визначення норм витрати електроенергії покладені в основу розробленої автором дисертації інструкції ЦЕ-0015.

Крім того, у цьому розділі розроблені наукові підходи і створена нормативна документація з визначення норм витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій, ПСК і ППС. Показано, що витрату електроенергії на власні потреби РУ-3,3 кВ доцільно визначати за встановленою потужністю і тривалістю роботи устаткування. Методологія, розроблена в ході написання дисертації, увійшла в інструкцію ЦЕ-0018.

Таблиця 6 – Значення коефіцієнтів A_d і B_d

Найменування залізниці	Значення коефіцієнтів	
	A_d	B_d
Придніпровська	34,8	$1,37 \cdot 10^{-6}$
Донецька	39,7	$1,31 \cdot 10^{-6}$
Південно-західна	35,6	$1,96 \cdot 10^{-6}$
Південна	49,8	$4,83 \cdot 10^{-6}$
Львівська	38,8	$3,67 \cdot 10^{-6}$
Одеська	30,6	$1,43 \cdot 10^{-6}$

Також у 6-му розділі описано підходи до розв'язання ще однієї складової комплексної проблеми енергозбереження – зменшення небалансів обліку електроенергії в системах електропостачання. На електрифікованих дільницях Донецької та Львівської залізниці були проведені експериментальні дослідження небалансів електроенергії. Встановлено, що причиною наднормативних небалансів електроенергії є низьке завантаження вимірювальних трансформаторів струму і напруги. Для зниження наднормативних небалансів електроенергії запропоновано привести навантаження вимірювальних трансформаторів у відповідність до вимог ГОСТ-1983 і ГОСТ-7746.

Для знаходження раціональних режимів функціонування систем тягового електропостачання постійного струму був розроблений програмний комплекс, структурна схема якого наведена на рис. 8.

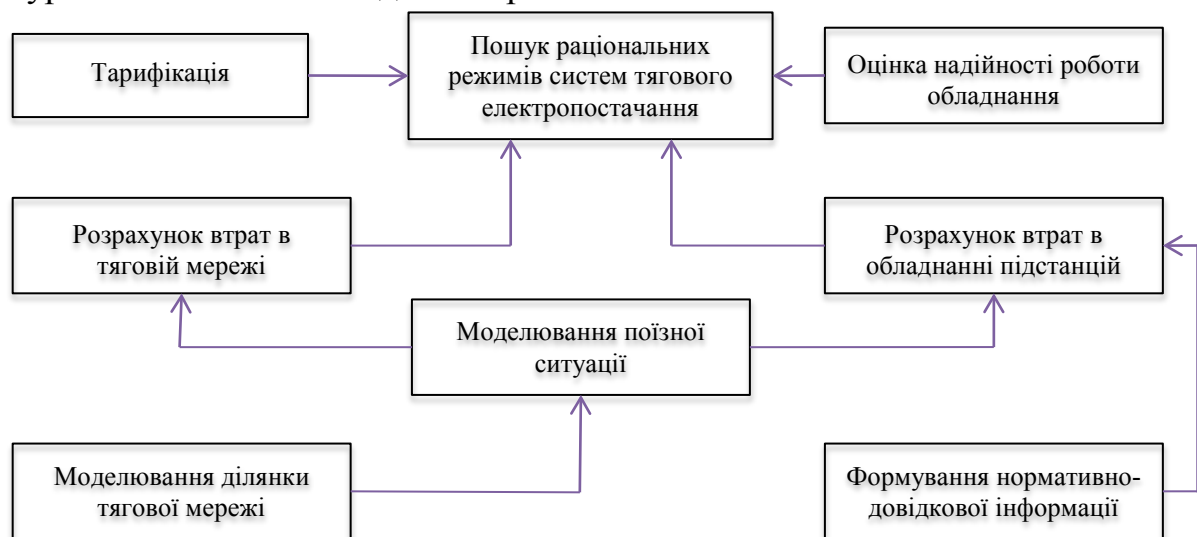


Рисунок 8 – Складові програмного комплексу

На основі розробленого ГА для Червоноармійської дистанції електропостачання Донецької залізниці були розроблені рекомендації з раціоналізації режимів СТЕ (рис. 9). На даній дистанції електропостачання були нерівномірно завантажені суміжні тягові підстанції У - К - Ж (добові витрати в 2009 році становили 39, 76 і 52 тис. кВт·год відповідно).

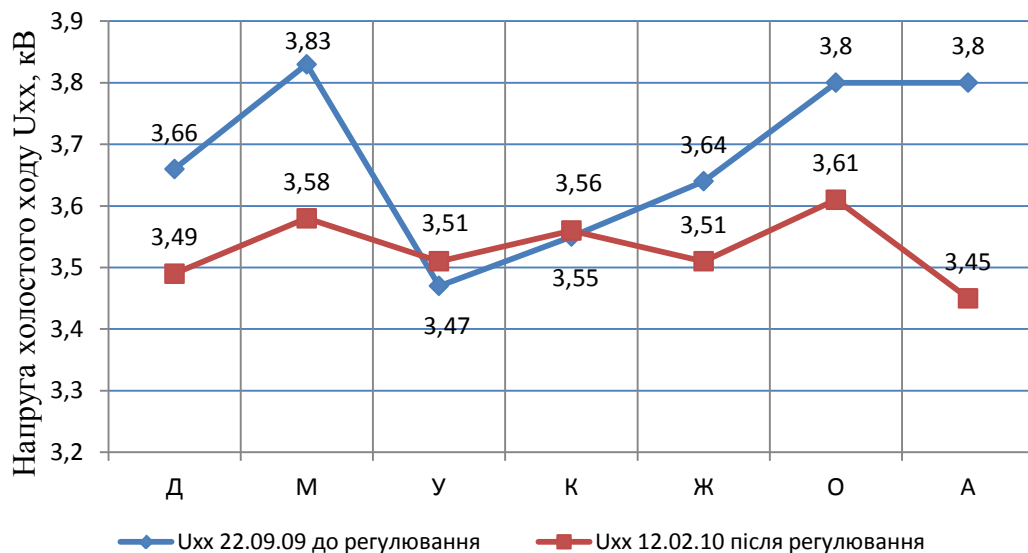


Рисунок 9 – Напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій ділянки Д-А до і після регулювання

Після розрахунку раціональних режимів на основі ГА в 2010 році було виконано перемикання анцапф тягових трансформаторів відповідно до цільової функції (6), що дозволило оптимізувати витрати електроенергії і напруги на шинах тягових підстанцій (добові витрати стали 51, 75 і 60 тис. кВт·год відповідно). Загальна витрата електроенергії на тягу по дистанції електропостачання у лютому 2010 р. становила 10,889 млн кВт·год проти 11,363 млн кВт·год у лютому 2009 р. при практично однаковій перевізній роботі, тобто зафіксоване зниження споживання електроенергії на 474 тис. кВт·год.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота є закінченою науковою працею, у якій на основі теоретичних і експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-технічна проблема – підвищення енергетичної й економічної ефективності систем електропостачання тяги поїздів постійного струму на основі розвитку теоретичних основ енергозбереження. Основні результати і висновки полягають у наступному.

1. Комплексний аналіз систем електропостачання тяги поїздів постійного струму залізниць України показав, що вони на сучасному етапі розвитку працюють в умовах лібералізації ринку електроенергії, значного зносу основного силового обладнання, незадовільної енергетичної та економічної ефективності. Зазначене вимагає розробки методів енергозбереження, які дозволяють знаходити рішення за кількома критеріями при змінних у часі тарифах на електроенергію та враховують рівень надійності силового обладнання.

2. На основі системного аналізу запропоновано метод визначення потенціалу енергозбереження для систем тягового електропостачання постійного струму, запропонована його класифікація. Розроблений метод визначення потенціалу енергозбереження дозволив визначити ефективність енергозберігаючих заходів з

урахуванням системного ефекту на основі оцінок прямого зниження втрат електроенергії в системі зовнішнього електропостачання.

3. Запропонована математична модель вибору енергозберігаючих заходів в системах тягового електропостачання на основі інваріантно-погодженого методу аналізу ієрархій дозволяє системно підходити до вибору енергозберігаючих заходів. Інваріантно-погоджений метод аналізу ієрархій забезпечує узгодженість експертних оцінок на всіх етапах ранжирування альтернатив. Для наочного представлення системи енергозберігаючих заходів в системі тягового електропостачання та визначення сумарного ефекту запропонована графова модель.

4. Розроблені на основі інваріантно-погодженого методу аналізу ієрархій науково-методологічні підходи до енергоефективної модернізації тягових підстанцій Донецької залізниці дозволили враховувати надійність силового обладнання, можливість використання змінних тарифів за електроенергію на тягу поїздів. Рекомендовано перейти на нову схему трансформації 35/3,3 кВ, яка дозволяє здійснювати закупівлю електроенергії за тарифом 1-го класу, а не за тарифом 2-го класу, як при старій схемі трансформації 35/6/3,3 кВ. Розрахунки показали, що економічний ефект від оптимізації витрат на придбання електроенергії для тягової підстанції Донецьк складає 3,04 млн грн в рік (в цінах 2009 р.).

5. Запропонована модель надійності системи тягового електропостачання постійного струму на основі структурно-логічного аналізу для задач керування режимами дозволяє визначити величину сумарного параметру потоку відмов. Це дає можливість оцінювати імовірності відмов при здійсненні операцій з регулювання режимів.

6. Запропонована модель економічного збитку від можливих відмов системи тягового електропостачання дозволяє визначити величину збитку для різних ситуацій, які пов'язані з регулюванням режимів. Для кожної елементарної ситуації дана модель передбачає представлення збитку у вигляді добутку імовірності відмови на вартість операції з відновлення (заміни) обладнання, яке втратило працездатність. Середню величину зазначених співмножників рекомендовано отримувати в умовах експлуатації за заводськими інструкціями і калькуляціями робіт відповідно.

7. За допомогою модернізованого методу розрахунку системи електропостачання тяги поїздів на основі потоків відновлення запропоновані вирази для визначення втрат потужності в елементах тягових підстанцій з урахуванням регульовальних впливів. Запропоновано вирази для визначення коефіцієнтів втрат потужності в контактній мережі, які можуть бути використані при організації непрямого методу контролю втрат електроенергії в дистанціях електропостачання.

8. Запропоновано визначати раціональні режими системи тягового електропостачання постійного струму на основі адаптованого генетичного алгоритму. Такий підхід дозволяє формувати регламент перемикачів обладнання фідерної ділянки з урахуванням можливості оплати за електроенергію за змінними у часі тарифами і надійності силового обладнання. В результаті оптимізації режимів на Червоноармійській дистанції електропостачання у 2010 році досягнуто зниження споживання електроенергії на 474 тис. кВт·год.

9. На основі дослідження залежностей величини втрат потужності в контактній мережі від дислокації поїздів і відстані між ними встановлено, що є істотний резерв зниження втрат в контактній мережі за рахунок вибору раціональної дислокації поїздів. Варіація втрат потужності в залежності від дислокації і відстані між поїздами склала 3,5 рази для ділянки Н.Д.- Вузол–Іларіонове і майже 10 разів для ділянки Письменна–Роздори.

10. Запропоновано регресійні залежності для визначення норм витрат електроенергії для стаціонарних споживачів залізниць України на рівнях лінійних підприємств, служб, залізниць, головних управлінь і на рівні Укрзалізниці, які використовуються в експлуатаційній роботі підприємств залізничного транспорту. Запропоновані наукові підходи до визначення норм витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій, постів секціонування і пунктів паралельного з'єднання дозволили планувати споживання електроенергії.

11. Результати дисертаційної роботи впроваджено в Головному управлінні електрифікації та електропостачання Укрзалізниці, службах електропостачання Донецької та Львівської залізниць, в Інституті залізничного транспорту (м. Варшава, Польща) та в навчальному процесі Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Основні положення і результати дисертації опубліковані в таких роботах:

Основні праці:

1. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії для споживачів залізничного транспорту: монографія / В. Г. Кузнецов. – Д.: Вид.-во Маковецький, 2012. – 216 с.
2. Кузнецов В. Г. Статистический подход к определению потерь электроэнергии в трансформаторах тяговых подстанций переменного тока / В. Г. Кузнецов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2005. – №6. – С.124-126.
3. Кузнецов В. Г. Оценка потерь электроэнергии в тяговой сети магистральных железных дорог / В. Г. Кузнецов, Р. С. Мицко, Д. О. Босий // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2006.–№12.– С.36-40.
4. Кузнецов В. Г. О подходе к определению оптимальной площади сечения контактной сети на участках электрифицированных железных дорог / В. Г. Кузнецов // Вісн. Хмельницького нац. ун.-ту. – 2006.–№2. – С.67-70.
5. Кузнецов В. Г. Визначення витрати електроенергії за нормою для стаціонарних споживачів на основну роботу залізниць / В. Г. Кузнецов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2007.–№14. – С.55-58.
6. Кузнецов В. Г. Анализ надежности существующей системы телемеханики на Приднепровской железной дороге / А. А. Матусевич, В. Г. Кузнецов // Залізничний трансп. України. – 2007.– №5. – С.72-73.
7. Кузнецов В. Г. Критерии оптимальной параллельной работы силовых трансформаторов для тяговых подстанций / В. Г. Кузнецов // Вісник Приазов. держ. техн. ун.-ту. – 2008.–№18.–Ч.2.– С.65-67.

8. Кузнецов В. Г. Оцінка втрат напруги при паралельній роботі тягових трансформаторів / В. Г. Кузнецов // Гірнича електромеханіка та автоматика: Науково-техн. зб.–2008.–№80. – С.18-22.
9. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби постів секціонування та пунктів паралельного з'єднання постійного струму / В. Г. Кузнецов, М. О. Іванов, О. О. Матусевич // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008.–№25. – С.30-33.
10. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій / В. Г. Кузнецов, М. О. Іванов, Ф. О. Фічоряк // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2008.–№21. – С.61-68.
11. Кузнецов В. Г. Вплив показника рівня захисту від загроз на надійність комплексу керування тяговим електропостачанням / О. О. Матусевич, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко // Залізничний трансп. України. – 2008.–№2. –С.32-36.
12. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов ведения поездов по критерию минимума стоимости потребленной активной и реактивной электроэнергии / В. В. Скалзуб, В. Г. Кузнецов, Д. А. Босый, А. П. Иванов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008.–№4. – С.111-114.
13. Кузнецов В. Г. Дослідження режиму напруги в тяговій мережі змінного струму при рекуперації електроенергії / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий // Вісн. Приазовського держ. техн. ун.-ту. – 2008.–№18, Ч.2. – С.35-39.
14. Кузнецов В. Г. Про коефіцієнт завантаження силових трансформаторів тягових підстанцій залізниць / В.Г. Кузнецов // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009.–№26. – С.56-59.
15. Кузнецов В. Г. Дослідження показників транспортного потоку на електрифікованій ділянці для визначення раціональних режимів системи тягового електропостачання / В.Г. Кузнецов, К.О. Калашников // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2010.–№3(82). – С.57-61.
16. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу величин напруг на шинах тягових підстанцій на корозійний стан опор контактної мережі / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Гірнича електромеханіка та автоматика: Науково-техн. зб.–2010.–№84. - С.38-45.
17. Кузнецов В. Г. Исследование работы системы электроснабжения постоянного тока при пропуске сдвоенных поездов / В. Г. Дзюман, В. Г. Сыченко, В. Г. Кузнецов, Т. И. Кирилюк // Електротехніка і електромеханіка. – 2011.–№3. – С.74-76.
18. Кузнецов В. Г. Оптимізація споживання електроенергії на електричному транспорті з використанням інформації автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко // Проблеми загальної енергетики. – 2011.–№3(26). – С.39-44.
19. Кузнецов В. Г. Оптимізація витрат Донецької залізниці при закупівлі електроенергії на тягу поїздів / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко, Т. І. Кирилюк // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізн. трансп. – 2011. –№122. –С.93-100.

20. Кузнецов В. Г. Задача определения условий рационального распределения мощности тяговой подстанции постоянного тока / В. Г. Кузнецов // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. – 2011.–№2/8 (50). – С.26-31.
21. Кузнецов В. Г. Дослідження небалансів електроенергії на тягових підстанціях / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилук // Технічна електродинаміка. – 2011.–Тематичний випуск Ч.2: Силова електроніка та енергоефективність. – С.181-186.
22. Кузнецов В. Г. Визначення показників потоку поїздів, які обмежують пропускну здатність ділянки за умовами електропостачання / В. Г. Кузнецов, Г. Я. Мозолевич, К. А. Калашников // Гірнична електромеханіка та автоматика: Науково-техн. зб. – 2011.–№87. – С.47-49.
23. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу показників транспортного потоку на втрати електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях, А. О. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.– 2011.–№36. – С.84-87.
24. Кузнецов В. Г. Експериментальне дослідження "умовних втрат" електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Ю. М. Сергатий, Т. І. Кирилук // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. – 2011.–№4/8 (52). – С.29-33.
25. Кузнецов В. Г. Инвариантно-согласованный метод анализа иерархий в задачах планирования энергосберегающих мероприятий системы электроснабжения железнодорожного транспорта / В. Г. Кузнецов, В. И. Шинкаренко // Системні технології. – 2011.–№6 (77). – С.77-85.
26. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу показників транспортного потоку на втрати електроенергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях, А. О. Полях // Вісн. Дніпропетр. нац. ун.-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.–2011. –№36. – С.84-87.
27. Кузнецов В. Г. Исследование факторов, определяющих величину потерь мощности в тяговой сети / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Вісник Нац. техн. ун.-ту "ХПІ": Зб. наук. пр.Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – 2012.–№18. – С.62-67.
28. Кузнецов В. Г. Оценка потенциала энергосбережения систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский // Вісник Нац. техн. ун.-ту "ХПІ".–2012.–№26. – С.109-116.
29. Kuzniecowa W. G. Problem zasilania energii w systemach zasilania trakcji elektrycznej / W. G. Kuzniecowa // Infrastruktura transportu.– 2012.–№3. – С.38-40.
30. Кузнецов В. Г. Учет надежности систем тягового электроснабжения при регулировании их режимов / В. Г. Кузнецов // Восточно-Европейский журн. передовых технологий. – 2012.–№3/8 (57). – С.20-24.
31. Кузнецов В. Г. Расчет рациональных режимов работы тяговых подстанций постоянного тока на основе генетического алгоритма / В. Г. Кузнецов, В. И. Шинкаренко, Н. В. Коваленко // Гірнична електромеханіка та автоматика: Науково-техн. зб. – 2012.–№88. – С.14-20.

Додаткові праці:

32. Кузнецов В. Г. Надійність і діагностика пристроїв тягового електропостачання : навчальний посібник / В. Г. Кузнецов, О. Г. Галкін, О. В. Єфімов, О. О. Матусевич.–Д.: Вид-во Маковецький, 2009.–248с.
33. Спосіб визначення стану опори контактної мережі: пат.33089 Україна: МПК (2006) B60M 1/00/Полях О. М., Кузнецов В. Г.;заявник та власник Дніпропетр. нац. ун.-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна.–№ u200801473; заявл. 5.2.2008; опубл. 10.6.2008; Бюл. №11.–4 с.
34. Кузнецов В. Г. Аналіз динаміки зміни "умовних" втрат електричної енергії в тяговій мережі / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилук, Ю. М. Сергатий // Електрифікація транспорту.–2011.–№1.– С.42-45.
35. Кузнецов В. Г. Исследование зависимости потерь мощности в тяговой сети от показателей неравномерности потока поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Електрифікація транспорту.–2011.–№2.– С.51-53.
36. Кузнецов В. Г. Эффективность параллельной работы трансформаторов тяговых подстанций участков переменного тока / В. Г. Кузнецов // Матеріали першої міжнар. науково–практ. конф. „Науковий потенціал світу – 2004”. Т. 60. Технічні науки.–Д.:Наука і освіта.–2004.– С.24-25.
37. Кузнецов В. Г. Визначення витрати електроенергії за нормою для стаціонарних споживачів залізниць / В. Г. Кузнецов // Тези 66-ї Міжнар. науково–практ. конф. „Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту”. –Д.:ДНУЗТ, 2006. – С.143.
38. Кузнецов В. Г. Стоимостная оптимизация режимов ведения грузовых поездов с учетом затрат активной и реактивной электроэнергии / А. А. Иванов, В. Г. Кузнецов // Тези доп. 6–ї Міжнар. науково–практ. конф. „Проблеми економіки транспорту”.–Д.:ДНУЗТ, 2007.– С.175.
39. Кузнецов В. Г. Нормування витрат електроенергії на власні потреби тягових підстанцій залізниць України / В. Г. Кузнецов // Тези доп. 1–ї Міжнар. науково–практ. конф. «Транселектро-2007».–Місхор:ДНУЗТ, 2007. – С.42.
40. Кузнецов В. Г. Визначення факторів, що впливають на довговічність стійок залізобетонних опор контактної мережі / В. Г. Кузнецов, О. М. Полях // Тези доп. 1–ї Міжнар. науково–практ. конф. «Транселектро-2007».–Місхор: ДНУЗТ, 2009.–С.53.
41. Кузнецов В. Г. Про оптимальний коефіцієнт завантаження силових трансформаторів / В. Г. Кузнецов // Тези доп. 2-ї Міжнар. науково-практ. конф. «Транселектро-2008».–Місхор: ДНУЗТ, 2008. – С.43.
42. Кузнецов В. Г. Підвищення енергетичної ефективності залізниць / В. Г. Кузнецов // 3б. матеріалів міжнар. науково-практ. конф. «Транспортні зв'язки.Проблеми та перспективи». –Д.: ДНУЗТ, 2008. – С.71.
43. Кузнецов В. Г. Расчет системы тягового электроснабжения с применением теории потоков восстановления / В. Г. Кузнецов // Тезисы докладов междунар. научной конф. "Трансбалтика-2009".–2009. –Вильнюс:Вильнюсский техн. ун.-т им. Гедиминаса. – С.35-36.

44. Кузнецов В. Г. Оптимизация графика движения поездов с учетом энергетической составляющей / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Тр. Междунар. научно–практ. конференции "Проблемы и перспективы развития транспортного комплекса: образование, наука, производств". – Ростов на Д.:РГУПС, 2009. – С.362-363.
45. Кузнецов В. Г. Підвищення енергетичної ефективності електротранспорту шляхом удосконалення процесу перевезень / В. Г. Кузнецов, К. О. Калашников // Тезиси докладов междунар. конф. "Транселектро-2009".–Місхор:ДПТ, 2009. –С.54-55.
46. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу роботи поїздного диспетчера на систему електропостачання / В. Г. Кузнецов, К. О. Калашников // Матеріали 1-й междунар. научно–практ. конф. "Енергосбережение на железнодорожном транспорте".– Мисхор:ДНУЖТ, 2010. – С.9-10.
47. Кузнецов В. Г. Визначення втрат енергії в системі тягового електропостачання / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Матеріали 1–й междунар. научно–практ. конф. "Енергосбережение на железнодорожном транспорте".–Мисхор:ДНУЖТ, 2010. – С.8.
48. Кузнецов В. Г. Дослідження впливу величин напруг на шинах тягових підстанцій на корозійний стан опор контактної мережі / В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Матеріали 4–й междунар. научно–практ. конф. "Електрифікація залізничного транспорту "Транселектро-2010".–Мисхор:ДНУЖТ, 2010. – С.96.
49. Кузнецов В. Г. Аспекти політики енергозбереження в тягових системах залізничного транспорту / С. В. Мямлін, В. Г. Кузнецов, В. Г. Сиченко // Матеріали 1–й междунар. научно-практ. конф. "Енергосбережение на железнодорожном транспорте".–Мисхор:ДНУЖТ, 2010. – С.13-18.
50. Кузнецов В. Г. Дослідження небалансів електроенергії на Львівській Залізниці / А. І. Барна, В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Матеріали 2-й междунар. научно-практ. конф. "Енергосбережение на железнодорожном транспорте". –Воловець:ДНУЖТ, 2011. – С.8.
51. Кузнецов В. Г. Шляхи підвищення ефективності експлуатації дільниць гірського профілю Львівської залізниці / І. С. Груник, В. Л. Горобець, В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов // Матеріали 2–й междунар. научно-практ. конф. "Енергосбережение на железнодорожном транспорте". –Ждениево:ДНУЖТ, 2011. – С.21-22.
52. Кузнецов В. Г. Проблеми небалансів електроенергії в системі тягового електропостачання / С. Д. Бітюков, В. Г. Кузнецов, Т. І. Кирилюк // Тезиси 4-й междунар. научно–практ. конф. "Електромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте".–Чинадиево:ДНУЖТ, 2011. –С.14-15.
53. Кузнецов В. Г. Подходы к оценке потенциала энергосбережения в системах электроснабжения железных дорог / В. Г. Кузнецов // Матеріали 5-й междунар. научно–практ. конф. «Електрифікація транспорту «Транселектро–2011».–Д.:ДНУЖТ, 2011. – С.38-40.

54. Кузнецов В. Г. Управление распределением мощности тяговых подстанций постоянного тока при расчетах за электроэнергию по оптовым ценам / В. Г. Кузнецов // Тезисы междунар. научно-практ. конф. «Современные информационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании». – Д.: ДНУЖТ, 2011. – С.17-18.
55. Кузнецов, В.Г. Повышение энергоэффективности электротранспорта постоянного тока путем оптимизации управления транспортным потоком / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Материалы 5-й междунар. научно-практ. конф. «Электрификация транспорта «Трансэлектро–2011». – Д.: ДНУЖТ, 2011. – С.40-41.
56. Кузнецов В. Г. Оптимизация взаимного расположения поездов на перегоне с учетом условий электроснабжения / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Тезисы 4-й междунар. научно–практ. конф. «Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте «ЕМС&S-R». – Чинадиево: ДНУЖТ, 2011. – С.48-49.
57. Кузнецов В. Г. Энергооптимальное управление потоком поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // Материалы 2-й междунар. научно–практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Ждениево: ДНУЖТ, 2011. – С.35-37.
58. Кузнецов В. Г. Экспериментальная проверка величин «условных потерь» электроэнергии в контактной сети / В. Г. Кузнецов, Ю. Н. Сергатый // Материалы 2-й междунар. научно-практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Воловец: ДНУЖТ, 2011. – С.38-40.
59. Кузнецов В. Г. Методические подходы к оценке общей энерго-экологической эффективности реализации мероприятий по снижению потребления электроэнергии на железнодорожном транспорте / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский, С. В. Шульженко // Материалы 3-й междунар. научно–практ. конф. «Энергосбережение на железнодорожном транспорте». – Воловец: ДНУЖТ, 2012. – С.39-40.

АНОТАЦІЯ

Кузнецов В. Г. Розвиток теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ, 2012.

Дисертація присвячена розвитку теоретичних основ енергозбереження в системах електропостачання тяги поїздів постійного струму для підвищення енергетичної та економічної ефективності процесу перевезень. У даній роботі проблема енергозбереження в системах тяги поїздів постійного струму розглядається як комплексна, багаторівнева й багатофакторна проблема. Створено методологічні підходи до вибору енергозберігаючих заходів у системах електропостачання тяги поїздів постійного струму. Удосконалено метод розрахунку

систем тягового електропостачання на основі потоків відновлення для визначення втрат потужності та електроенергії в елементах тягових підстанцій. Розроблено метод визначення раціональних режимів систем тягового електропостачання постійного струму на основі генетичного алгоритму, визначено раціональні регламенти перемикачів. Розроблено науково обґрунтовані методи визначення норм витрат електроенергії на потреби стаціонарних споживачів та на власні потреби тягових підстанцій, постів секціонування й пунктів паралельного з'єднання. Надано науково обґрунтовані рекомендації зі зниження небалансів електроенергії.

Розроблені моделі й методи в сукупності складають теоретичні основи вирішення комплексних завдань енергозбереження, що виникають під час експлуатації систем електропостачання тяги поїздів постійного струму.

Ключові слова: тягове електропостачання, втрати електроенергії, генетичний алгоритм, метод аналізу ієрархій, енергетична ефективність, нормування енергоресурсів, небаланс електроенергії, потенціал енергозбереження.

АННОТАЦІЯ

Кузнецов В. Г. Развитие теоретических основ энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепропетровск, 2012.

Диссертация посвящена развитию теоретических основ энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока для повышения энергетической и экономической эффективности процесса перевозок. В данной работе проблема энергосбережения в системах тяги поездов постоянного тока рассматривается как комплексная, многоуровневая и многофакторная проблема. В работе созданы методологические основы выбора энергосберегающих мероприятий в системах тягового электроснабжения на основе определения потенциала энергосбережения с учетом системного эффекта, выбора альтернатив на предложенной графовой модели, инвариантно-согласованного метода анализа иерархий. На основе разработанных методологических основ предложены научные подходы к модернизации тяговых подстанций с учетом возможности перевода тяги поездов на высший класс напряжения.

Разработаны новые научные подходы к определению условий рациональных режимов систем тягового электроснабжения. Показано, что при принятии решений необходимо учитывать возможность расчетов за потребленную электроэнергию по переменным в течение дня тарифам за электроэнергию. Также необходимо учитывать надежность силового оборудования, участвующего в регулировании. Составлена структурно-логическая схема для расчета показателей потока отказов при осуществлении регулирования режимов. На основе информации о величине потока отказов и типовых калькуляций работ определены величины экономического ущерба от возможных отказов при осуществлении регулирования.

Усовершенствован метод расчета систем тягового электроснабжения на базе потоков восстановления в части дополнения его расчетными выражениями для определения потерь мощности и электроэнергии в элементах тяговых подстанций с учетом регулировочных воздействий.

Разработан генетический алгоритм для решения задачи определения рациональных режимов системы электроснабжения тяги поездов постоянного тока. Разработан метод расчета регламента переключений оборудования фидерного участка, в котором учитываются современные возможности оплаты за электроэнергию по двух-, трехзонным тарифам и оптовым ценам, потери надежности оборудования при переключениях, а также соответствующее программное обеспечение.

Установлена зависимость величины потерь мощности в тяговой сети от дислокации поездов и расстояния между ними. Показано, что имеется существенный резерв по снижению потерь в контактной сети за счет подбора рациональной дислокации поездов. Вариация потерь мощности в зависимости от дислокации и расстояния между поездами достигает 3,5 раза на одной из межподстанционных зон постоянного тока.

Разработаны усовершенствованные методологические основы и создана нормативная документация по определению норм расхода электроэнергии на нужды стационарных потребителей железных дорог Украины. При этом нормы расхода электроэнергии определяются по регрессионным зависимостям. Предложенная методология легла в основу методических указаний ЦЕ-0015.

Созданы научные подходы и нормативная документация по определению норм расходов электроэнергии на собственные нужды тяговых подстанций, постов секционирования и пунктов параллельного соединения. Показано, что расход электроэнергии на собственные нужды распределительных устройств 3,3 кВ целесообразно определять по установленной мощности и продолжительности работы оборудования. На основе предложенных подходов создана инструкция ЦЕ-0018.

Установлено, что причиной сверхнормативных небалансов электроэнергии является низкая загрузка измерительных трансформаторов тока и напряжения. Для подтверждения нормируемых метрологических характеристик трансформаторов напряжения согласно их классам точности 0,5 при действительных значениях мощностей и коэффициентов мощности их вторичной нагрузки было предложено мощность вторичной нагрузки обмоток и коэффициенты мощности вторичной нагрузки трансформатора напряжения привести в соответствие с требованиями ГОСТ-1983 и ГОСТ-7746 соответственно. Для этой цели предложено подключать к вторичной обмотке трансформатора напряжения добавочное сопротивление.

Разработанные модели и методы в совокупности составляют теоретические основы по решению комплексных задач энергосбережения, возникающих при эксплуатации систем электроснабжения тяги поездов постоянного тока.

Ключевые слова: тяговое электроснабжение, потери электроэнергии, генетический алгоритм, метод анализа иерархий, энергетическая эффективность,

нормирование энергоресурсов, небаланс электроэнергии, потенциал энергосбережения.

ABSTRACT

Kuznetsov V.G. The development of the theoretical bases in DC traction power supply systems - Manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences in specialty 05.22.09 - electric transport. - Dnipropetrovsk national university of railway transport named after academician V.Lazaryana, Dnipropetrovsk, 2012.

The thesis is dedicated to the development of theoretical bases of DC traction power supply systems to increase energy and economic efficiency of the transport. In this paper the energy saving problem in DC traction systems is considered as a complex, multilevel and multifactorial problem. It's created a methodological approach to the selection of energy saving measures in the DC traction power supply systems. It's improved the method for calculating the traction power supply systems based on the restoration flows for estimating the power and energy losses in the elements of traction substations. It's developed the method for determination of rational modes of DC traction power supply systems based on genetic algorithm, defined the rational switching rules. The author developed scientific justified methods for determining norms of electricity needs for stationary consumers and for self needs of traction substations, sectioning posts and points of parallel connection. Provided scientific and reasonable guidelines for reducing power unbalances.

The developed models and methods together form the theoretical basis for solving complex energy saving problems during exploitation of electrical DC traction systems.

Keywords: traction power supply, power losses, genetic algorithm, the method of hierarchy analysis, energy efficiency, energy regulation, power unbalance, energy saving potential.

Кузнецов Валерій Геннадійович

РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТЯГИ ПОЇЗДІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Формат 60x84 1/16. Підписано до друку 26.10.2012.

Папір для множильних апаратів. Різограф.

Ум. друк. арк. 1,9. Обл.—вид. арк. 1,9. Тираж 100 пр.

Видавництво Дніпропетровського національного університету залізничного
транспорту імені академіка В. Лазаряна

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №1315 від 31.03.2003

Адреса видавництва і дільниці оперативної поліграфії:

вул. Лазаряна, 2, Дніпропетровськ, 49010