

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Доманська Галина Анатоліївна

УДК 621.331.621.311.52

**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ЗАЛІЗНИЦЬ З УРАХУВАННЯМ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЖИВЛЯЧИХ ЇХ
ЕНЕРГОСИСТЕМ**

Спеціальність 05.22.09 - Електротранспорт

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства транспорту та зв'язку України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук
Корнієнко Володимир Володимирович,
Державна адміністрація залізничного транспорту України,
перший заступник генерального директора, м. Київ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Сивокобиленко Віталій Федорович,
Донецький національний технічний університет,
завідувач кафедри електричних станцій, м. Донецьк;

кандидат технічних наук, доцент
Землянов Володимир Борисович,
Придніпровська залізниця, заступник головного інженера
залізниці – начальник інформаційно-статистичного центру,
м. Дніпропетровськ.

Захист відбудеться « 9 » квітня 2008 р. о 14³⁰ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.15
у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут»
за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись в науковій бібліотеці
Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»
за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий « 6 » березня 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Любарський Б.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Необхідність ресурсозбереження і економії енергії вимагають застосування енергозберігаючих технологій систем тягового електропостачання, що мінімізують енергетичні витрати в процесі перевезень. Превалюючим енергоносієм для здійснення перевезень на залізницях України, вантажонапруженість яких у 3,5 раз перевищує середньоєвропейський рівень, є електроенергія (6 млрд. кВт·г в рік або 4,5 % електроенергії, що виробляється в країні). Щоб прийняти такий обсяг енергії і перетворити її для тяги поїздів застосовується система тягового електропостачання, яка відрізняється від класичних систем електроенергетики.

Технології реалізації енергозберігаючих режимів роботи систем зовнішнього і тягового електропостачання різні. Забезпеченню енергозберігаючих режимів роботи завжди приділялося багато уваги, як в електротягових мережах, так і в мережах зовнішнього електропостачання, проте мінімізація перетоків потужності і втрат енергії та створення баз даних для інтегрованих систем управління вимагають сумісного розгляду режимів їх роботи. Ще більше врахування режимів роботи систем зовнішнього електропостачання вимагають умови енергозберігаючих технологій швидкісного і високошвидкісного руху, при якому міняється характер і потужність тягових навантажень і виникають особливі режими роботи тягових трансформаторів. В зв'язку з вищевикладеним доцільно виконати дослідження параметрів тягової мережі, які забезпечують режими енергозбереження.

З огляду на те, що в збільшенні вантажонапруженості міжнародних транспортних коридорів (прогнозується на 25 – 30 %) та реалізації швидкісного і високошвидкісного руху вирішальна роль як і раніше належатиме електрифікації залізниць, то дисертаційна робота направлена на створення енергозберігаючих технологій у тяговому електропостачанні і економії електроенергії актуальна, а її виконання доцільне з погляду енергетичної стратегії України.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана за науково-технічною тематикою, визначеною галузевою програмою енергозбереження на залізничному транспорті України на 1996 – 2010 роки (затверджена техніко-економічною радою Укрзалізниці 24.06.96 р., протокол №5, розділи 1, 2, 4), у рамках науково-дослідних робіт Міністерства транспорту і зв'язку України “Інтелектуальні задачі та алгоритми їх рішення для управління приладами електропостачання електрифікованих залізниць” (№ ДР 0199U001432), “Розробка технології енергооптимального керування пристроями електропостачання електрифікованих ділянок залізниць” (№ ДР 0101U002583), “Підвищення енергетичної ефективності і економічності роботи електротягових систем” (№ ДР 0103U005112), де здобувач був виконавцем окремих розділів.

Мета і задачі досліджень. Метою дисертаційної роботи є розвиток наукових основ енергозбереження в тягових мережах залізниць з позицій розгляду їх нерозривного зв'язку з системами зовнішнього електропостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити комплексні інформаційні технології, що забезпечують реалізацію енергозберігаючих режимів роботи тягових мереж електрифікованих ліній залізниць

з урахуванням режимів роботи енергосистем, що їх живлять;

- розробити алгоритми і програми для моделювання режимів роботи тягових мереж електрифікованих ліній з урахуванням енергосистем, що їх живлять і вирішити ряд практичних задач, що забезпечують накопичення баз даних експертних систем управління;

- розробити перспективні алгоритми реалізації енергозберігаючих технологій при здійсненні перевезень на залізницях;

- знайти енергоекономічні характеристики режимів роботи системи електропостачання змінного струму для різних вантажопотоків;

- запропонувати енергозберігаючі режими роботи систем тягового електропостачання, які мінімізують енергетичні витрати в процесі перевезень.

Об'єкт дослідження – процес роботи систем тягового і зовнішнього електропостачання як об'єктів нерозривного взаємозв'язку при зниженні енергетичних витрат в собівартості перевезень залізниць.

Предмет дослідження – енергозберігаючі технології тягового електропостачання з урахуванням режимів роботи енергосистем, що їх живлять, які дозволяють мінімізувати енергетичні витрати в процесі перевезень на залізницях.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження виконувалися з використанням методів системного аналізу, теорії електричної тяги, теорії графів і матричних методів розрахунку електричних мереж, математичного моделювання режимів роботи систем тягового електропостачання. Експериментальні дослідження виконувалися з використанням сучасних інформаційно-діагностичних комплексів “Регіна” Інституту електродинаміки НАН України (м. Київ) та методів математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- науково обґрунтована ефективність використання інформаційних технологій для реалізації енергозберігаючих режимів роботи систем тягового електропостачання, що полягає в комплексному рішенні взаємозв'язаних задач: раціональних по показнику вартості електроенергії тарифах, компромісно-оптимальних режимах тяги поїздів і раціональних по перетокам потужності режимах роботи тягового і зовнішнього електропостачання;

- розроблені методи розрахунку і моделювання тягового електропостачання, що відрізняються урахуванням нерозривного взаємозв'язку з зовнішніми енергосистемами і дозволяють в порівнянні з існуючими методами підвищити точність розрахунку параметрів і вибрати раціональні режими з мінімальними перетоками потужності та втратами енергії;

- одержали подальший розвиток способи формування і перетворення графів складних схем систем тягового і зовнішнього електропостачання та побудови експертних систем управління для реалізації технологій енергозбереження електрифікованих залізниць;

- вперше запропоновані методи управління режимами роботи системи тягового електропостачання на основі нечіткого опису їх станів та експертної системи, що дозволяють вирішити нові задачі, в тому числі вибір енергозберігаючих схем живлення при перетоках потужності, економічних режимів роботи мережі при інтенсифікації процесу перевезень;

- встановлено, що ймовірність рівномірного електроспоживання тягових підстанцій і як наслідок якість електроенергії підвищується за рахунок можливості регулювання параметрів вантажопотоку шляхом використання вільних ниток графіка руху поїздів і збільшення районного навантаження.

Викладені в роботі основні положення, методи розрахунку, висновки і рекомендації підтверджені строгістю теоретичного обґрунтування, зіставленням результатів аналітичного розрахунку з даними, отриманими на імітаційних моделях, порівнянням з експериментальними дослідженнями, відмінність між різними параметрами яких лежать в межах 1,5 – 5 % та авторськими свідоцтвами.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблені наукові пропозиції увійшли в методику визначення витрат за електроспоживання на електрифікованих лініях залізниць, яка базується на раціональних по показнику вартості електроенергії тарифах, компромісно-оптимальних режимах тяги поїздів і енергозберігаючих режимах роботи систем тягового і зовнішнього електропостачання, що в комплексі дозволяє істотно (5 – 10 %) знизити плату за споживану енергію і собівартість перевезень.

На основі досліджень запропоновані шляхи зниження електроспоживання і мінімізації втрат енергії систем тягового електропостачання, які дозволяють за рахунок регулювання параметрів вантажопотоку і рівнів напруги тягових підстанцій мінімізувати перетоки потужності і втрати електроенергії та підвищити енергетичну ефективність роботи електрифікованих ліній залізниць.

Розроблена методика техніко-економічної доцільності схем живлення тягових мереж і оцінки можливості переходу на консольні схеми живлення або петлеві з пунктами паралельного з'єднання. Впроваджені рекомендації заощаджують близько 25 тис. кВт·г на 1 км двоколійної ділянки.

Розроблені технології вдосконалення режимів роботи електротягових систем включені в рекомендації по забезпеченню енергооптимального процесу перевезень на основі інформаційних технологій управління системами електричної тяги для країн Організації співдружності залізниць (ОСЗ).

Практична цінність підтверджена довідками і актом про впровадження дисертаційної роботи в Державній адміністрації залізничного транспорту України, в Київдіпротрансі (м. Київ), на Придніпровській залізниці (м. Дніпропетровськ).

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення дисертації, які виносяться на захист, розроблені здобувачем самостійно. Серед них:

- методи розрахунку і моделювання тягового електропостачання з урахуванням взаємозв'язку з зовнішніми енергосистемами, які дозволяють підвищити точність розрахунку параметрів та вибрати раціональні режими з мінімальними перетоками потужності та втратами енергії;

- методи управління режимами роботи системи тягового електропостачання на основі нечіткого опису їх станів та експертної системи, які дозволяють вирішити перспективні задачі, в тому числі вибір схем живлення при перетоках потужності та економічних режимів роботи електротягової мережі при інтенсифікації процесу перевезень на залізницях;

- закономірності підвищення активних і реактивних втрат енергії в електро-

тягових мережах в процесі перевезень, які дозволяють реалізувати перспективні методи управління та знизити втрати енергії в 1,5 – 2 рази за умови реалізації рівномірного графіка руху поїздів і раціональних режимів роботи тягових мереж;

- методика економічної доцільності схем живлення тягової мережі, що враховує регресійну залежність між витратою енергії на тягу і обсягом перевезень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації доповідалися і обговорювалися на: міжнародному симпозиумі Eltrans “Електрифікація і науково-технічний прогрес на залізничному транспорті” (2003 р., м. Санкт-Петербург, Росія); науково-практичній конференції «Електрифікація – основа технічного переозброєння залізничного транспорту» (2004 р., м. Щербинка, ВНДІЗТ, Росія); міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність 2004» (2004 р., м. Одеса); міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту» (2005 р., м. Дніпропетровськ); міжнародній науково-технічній конференції «Наука, інновації, освіта: актуальні проблеми розвитку транспортного комплексу Росії» (2006 р., м. Екатеринбург, Росія); міжнародному симпозиумі Eltrans “Електрифікація і організація швидкісних і великовагових коридорів на залізничному транспорті” (2007 р., м. Санкт-Петербург, Росія).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 17 наукових працях, серед них 12 – у фахових виданнях ВАК України, 2 – авторських свідоцтва.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 4-х розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації складає 205 сторінок, серед них: 39 рисунків за текстом, 11 рисунків на 11 окремих сторінках, 10 таблиць за текстом, 3 на 3 окремих сторінках, 6 додатків на 25 сторінках, 152 найменувань літературних джерел на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність проблеми, що розв'язується в дисертації, сформульована її мета, наукова новизна і практична цінність.

Передумовою до постановки і рішення задачі забезпечення енергозберігаючих технологій систем тягового електропостачання (СТЕ) з урахуванням режимів роботи енергосистем, що їх живлять є праці вчених залізничного транспорту: А.Т. Буркова, О.Л. Бикадорова, Л.А. Германа, В.Т. Доманського, А.В. Котельникова, Р.Р. Мамошина, К.Г. Марквардта, Р.І. Мірошніченко, В.Н. Пупиніна, Е.П. Фігурнова та ін. У рішенні задач підвищення економічності режимів роботи електричних мереж і енергосистем величезну роль грають роботи: В.А. Венікова, Г.М. Каялова, Н.А. Мельнікова, В.Ф. Сивокобиленко, Б.С. Стогнія, Д.В. Тимофєєва, А.К. Шидловського та ін.

Запропонований в дисертації підхід до розробки комплексних інформаційних технологій енергозбереження на електрифікованих залізницях дозволив розвинути і узагальнити фундаментальні дослідження відмічених вище авторів у області режимів СТЕ з урахуванням їх нерозривного взаємозв'язку з енергосистемами і специфікою роботи на оптовому ринку електроенергії (ОРЕ).

У першому розділі виконано системний аналіз вітчизняних і зарубіжних систем електротяги, обґрунтована і запропонована концепція їх розвитку, що забезпечує ресурсо- і енергозбереження.

Ключовим питанням підвищення енергетичної ефективності в системах тягового електропостачання постійного струму є розробка перетворювача постійно-постійного струму з підвищеною вхідною напругою. Як показують попередні розрахунки, виконані у ВНДІЗТі (Росія), очікувані втрати енергії в триступневих перетворювальних пунктах постійно-постійного струму при напрузі живлення 24 кВ зведуть нанівець вигоду від передачі енергії до поїздів на постійному струмі в порівнянні із змінним. Проте, методи розрахунку таких мереж необхідно розвивати і важливим фактором їх точності і достовірності є урахування режимів роботи живлячих енергосистем.

У технології електропостачання на змінному струмі 25 кВ, 50 Гц, також існує ряд недоліків, зокрема: часті виходи тягових підстанцій в мережі напругою 220 або 110 кВ і як результат будівництва таких мереж на цих напрямках за рахунок залізниць; не ефективне використання потужності трансформаторів тягових підстанцій (всього на 68 % від їх номінальних значень); наявність зрівняльних струмів в тягових мережах міжпідстанційної зони.

Досвід енергетичних обстежень в Росії показує, що приблизно в кожній третій міжпідстанційній зоні полігону змінного струму втрати від протікання зрівняльних струмів складають не менше 250 тисяч кВт·г в рік, а в окремих випадках перевищують 1 мільйон кВт·г в рік.

Розвиток перспективних систем (рис. 1) і підвищення їх енергетичної ефективності йде за рахунок вдосконалення автотрансформаторних систем шляхом збільшення напруги живлячого проводу. Режим роботи автотрансформаторних систем істотно знижують несиметричність тягових навантажень, неоднорідність тягових і живлячих їх мереж і підвищують енергетичну ефективність.

Так введення в експлуатацію ділянки Пренцлау – Штральзунд (Німеччина) за системою 2Ч15 кВ, 16 2/3 Гц в 2002 році забезпечило економію електроенергії до 10 %. У 2006 році система з симетрируючими трансформаторами, запропонована МПТом, пройшла випробування на Північній дорозі, але із-за складності тягового трансформатора в Росії не експлуатується. На наш погляд перспективнішою є система, запропонована в дисертації, зі вставками постійного струму і розв'язками з ЛЕП 220 і 330 кВ районних підстанцій та власними залізничними лініями 110 кВ із звичайними трифазними або однофазними тяговими трансформаторами 27,5 кВ. Запропоновані технології електропостачання перспективні і для майбутніх високошвидкісних ліній Українських залізниць.

Системний аналіз технологій електропостачання і перспектив їх розвитку дозволяють сформулювати вимоги до енергозберігаючих технологій залізниць як найбільш економічного виду транспорту, що забезпечує переважні обсяги вантажоперевезень країни (76,8 % загальнодержавного вантажообігу). Питома вага електротяги в експлуатаційній роботі для різних залізниць лежить в межах 80 – 90 %. На рис. 2 показано, що питома електроспоживання стабільно або знижується в період збалансованого використання двох способів освоєння приросту вантажообігу: маси поїзда і розмірів руху (наприклад, 55 % за рахунок збільшення розмірів руху і 45 % за рахунок підвищення маси). В період різкого спаду вантажообігу (1990 – 1995 роки) спостерігається зростання питомого електроспоживання. Не врахування цього явища і

захопленість збільшенням маси поїздів може в умовах різкого зростання ціни енергоресурсів значно підвищити собівартість перевезень.

Зараз Росія, ЮАР, Китай, США, Канада йдуть по шляху реалізації великовагового руху. В умовах роботи залізниць України на ОРЕ не виключається енергоекономічна ефективність великовагового руху на деяких напрямках. Попередні розрахунки, проведені для вантажонапружених магістралей, підтверджують спеціальні дослідження ВНДІЗТа, які показали, що при збільшенні довжини поїзда на 25 %, витрата електроенергії на їх ведення за інших рівних умов збільшується лише на 18 %. Різниця 7 % – це можлива економія експлуатаційних витрат. У розділі обґрунтовані діапазони пропускної спроможності і процентний зміст великовагових поїздів (8 – 10 %) від потоку, що дозволяє рівномірно завантажувати СТЕ і реалізувати перевезення по критерію мінімальних втрат енергії.

У другому розділі розглянуті теоретичні і практичні питання розвитку методів розрахунку режимів тягового електропостачання з урахуванням зовнішніх енергосистем (ЗСЕ), що їх живлять, які дозволяють підвищити точність розрахунку перетоків потужності та втрат енергії (5 – 10 %) і вибрати енергозберігаючі режими.

Запропоновані схеми формалізації графів і матриць ділянок зовнішнього і тягового електропостачання з щільними стрічковими і профільно-розрідженими матрицями, які базуються на прямих методах рішення систем лінійних алгебраїчних рівнянь, структурних числах і тензорах. Для моделювання складно-несиметричних режимів СТЕ запропоновано використовувати решітчасті схеми (рис. 3), які легко описуються графами і матрицями.

Для електротягових мереж, і мереж ЗСЕ з великою ступеню розгалуженості у вузлах розроблені нові алгоритми формування структурованих матриць пасивних параметрів з виділенням віток з трансформаціями, що дозволяють значно скоротити витрати часу на підготовку баз даних і на розрахунки (до 5 %). При цьому схеми тягової мережі можуть бути будь-якого ступеня складності: однопутні, двоколіїні, багатокіліїні ділянки і станційні колії (рис. 4).

Розрахунок втрат енергії в тягових мережах зводиться до послідовного розрахунку ряду модельованих миттєвих схем

$$\Delta W = \sum_{i=1}^T \Delta S_i = \sum_{i=1}^T \dot{\mathbf{I}}_{ti} \mathbf{Z}_{Bi} \mathbf{I}_{Bi}^* , \quad (1)$$

де ΔS_i – втрати потужності миттєвої схеми; $\dot{\mathbf{I}}_t = (\dot{I}_{t1}, \dot{I}_{t2}, \dots, \dot{I}_{tn})$ – транспонований вектор струмів в вітках схеми; \mathbf{Z}_B – матриця опорів віток; $\mathbf{I}_B^* = (I_1^*, I_2^*, \dots, I_n^*)$ – спряжений вектор струмів в вітках схеми; T – кількість вирішених миттєвих схем; n – кількість віток схеми.

Складаючи блокові матриці можна одержати вираз для визначення струмів віток без приведення до однієї базисної напруги всієї схеми

$$\dot{\mathbf{I}}_B = \begin{pmatrix} \dot{I}_{\alpha\xi} \\ \dot{I}_{\alpha\tau} \\ \dot{I}_{\beta\tau} \\ \dot{I}_{\beta\xi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{M} \\ \mathbf{N} \mathbf{Z}_B \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{J} \\ \mathbf{N} \dot{\mathbf{E}}_\Sigma \end{pmatrix}; \quad \dot{\mathbf{E}}_\Sigma = (\dot{\mathbf{E}} + \dot{\mathbf{E}}_\tau) = \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{E}}_{\alpha\xi} \\ \dot{\mathbf{E}}_{\alpha\xi} + \dot{\mathbf{K}} \dot{\mathbf{E}}_{\beta\tau} \\ \dot{\mathbf{E}}_{\beta\xi} + \dot{\mathbf{E}}_{\beta\tau} \\ \dot{\mathbf{E}}_{\beta\xi} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де $\mathbf{M}_{m \times n}$ і $\mathbf{N}_{k \times n}$ – перша і друга матриці інциденцій; m – кількість вузлів; $k = n - m$ – кількість незалежних контурів; $\mathbf{J} = (J_1, J_2, \dots, J_m)$ – вектор задаючих струмів; $\dot{\mathbf{E}}_\Sigma$ – сумарний вектор е.д.с. віток. Тут елементи ϕ у векторах $\dot{\mathbf{E}}_\tau$ і $\dot{\mathbf{I}}_B$ зв'язані залежностями $\dot{\mathbf{E}}_{\alpha\tau} = \dot{\mathbf{K}} \dot{\mathbf{E}}_{\beta\tau}$ і $-\dot{\mathbf{K}} \dot{\mathbf{I}}_{\alpha\tau} = \dot{\mathbf{I}}_{\beta\tau}$, де $\dot{\mathbf{K}}$ – квадратна матриця коефіцієнтів трансформації розмірністю ϕ ; b – вітки дерева схеми; e – вітки хорд схеми; o – вітки дерева і хорд не зв'язані з трансформаціями.

Розділивши матрицю \mathbf{M} на блоки можна виділити струми в вітках дерева схеми $\dot{\mathbf{I}}_\alpha = (\dot{I}_{\alpha 1}, \dot{I}_{\alpha 2}, \dots, \dot{I}_{\alpha m})$; $\dot{\mathbf{I}}_\beta = (\dot{I}_{\beta 1}, \dot{I}_{\beta 2}, \dots, \dot{I}_{\beta k})$. У свою чергу у векторах $\dot{\mathbf{I}}_\alpha$ і $\dot{\mathbf{I}}_\beta$ струми віток можна розділити за принципом відсутності і наявності трансформацій. Тоді $\dot{\mathbf{I}}_\alpha = (\dot{I}_{\alpha\xi 1}, \dot{I}_{\alpha\xi 2}, \dots, \dot{I}_{\alpha\tau 1}, \dots, \dot{I}_{\alpha\tau m})$, $\dot{\mathbf{I}}_\beta = (\dot{I}_{\beta\tau 1}, \dot{I}_{\beta\tau 2}, \dots, \dot{I}_{\beta\xi k})$. Аналогічно сумарний вектор е.д.с. віток $(\dot{\mathbf{E}} + \dot{\mathbf{E}}_\tau)$ можна структурувати за принципом е.д.с. віток з трансформаціями дерева і хорд схеми і інших е.д.с.

Для скорочення витрат машинного часу доцільно перетворити матричні рівняння. З цією метою струми в вітках схеми представляють на підставі методу накладення у вигляді суми $\dot{\mathbf{I}}_B = \dot{\mathbf{I}}_B' + \dot{\mathbf{I}}_B''$. Тут складова $\dot{\mathbf{I}}_B'$ пов'язана з контурними струмами співвідношенням $\mathcal{E}_B' = \mathbf{N}_t \mathcal{E}_k$, де \mathbf{N}_t – транспонована друга матриця інциденцій; \mathcal{E}_k – вектор контурних струмів. Складову \mathcal{E}_B'' , залежну від задаючих струмів поїздів, можна знайти з виразу $\dot{\mathbf{I}}_B'' = \begin{pmatrix} \mathbf{M}_\alpha^{-1} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \mathbf{J}$, де \mathbf{M}_α^{-1} – обернена матриця інциденцій для дерева схеми.

Тоді для визначення струмів в вітках схеми по відомим навантаженням поїздів і навантаженням зовнішньої системи електропостачання одержимо вираз

$$\dot{\mathbf{I}}_B = \mathbf{N}_t \left\{ (\mathbf{N} \mathbf{Z}_B \mathbf{N}_t)^{-1} \left[\mathbf{N} (\dot{\mathbf{E}} + \dot{\mathbf{E}}_\tau) - \mathbf{N} \mathbf{Z}_B \begin{pmatrix} \mathbf{M}_\alpha^{-1} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \mathbf{J} \right] \right\} + \begin{pmatrix} \mathbf{M}_\alpha^{-1} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \mathbf{J}. \quad (3)$$

Падіння напруги на ділянці мережі від будь-якого вузла до базисного знаходиться по виразу $\Delta \dot{\mathbf{U}} = \mathbf{M}_{\alpha t}^{-1} \dot{\mathbf{U}}_\alpha$, де $\dot{\mathbf{U}}_\alpha = \mathbf{Z}_\alpha \dot{\mathbf{I}} - \dot{\mathbf{E}}_\alpha$ – вектор падіння напруги на вітках дерева схеми; $\dot{\mathbf{E}}_\alpha$ – е.д.с. в вітках дерева схеми.

Роздільний розгляд кожної електрично незалежної ділянки мережі при визначенні його узагальнених параметрів дозволяє декілька спростити розрахунок, але вимагає для урахування взаємодій через трансформації еквівалентних перетворень. Розглянемо ділянку мережі зовнішньої системи електропостачання, що є кільцевою мережею 110 кВ (має індекс I) і ділянку тягової мережі 27,5 кВ (індекс II) (рис. 5).

Для кожної ділянки I і II рівняння стану з урахуванням взаємозв'язків $\dot{K}\dot{E}_{\tau II} = \dot{E}_{\tau I}$ і $-\dot{K}\dot{J}_I = \dot{J}_{II}$ можна записати у вигляді

$$\dot{J}_I = \dot{Y}_I(\dot{K}\dot{E}_{\tau II} - \dot{U}_\delta \mathbf{n}) + \dot{J}_{0I} ; \quad -\dot{K}\dot{J}_I = \dot{Y}_{II}\dot{E}_{\tau II} + \dot{J}_{0II} , \quad (4)$$

де \dot{J}_I, \dot{J}_{II} – вектори задаючих струмів у вузлах, що зв'язують мережі зовнішнього I і тягового II електропостачання; $\dot{E}_{\tau I}, \dot{E}_{\tau II}$ – вектори э.д.с. в вітках з трансформаціями; \dot{U}_δ – напруга в базисному вузлі; \mathbf{n} – одиничний вектор з розмірністю кількості вузлів схеми; $\dot{J}_{0I}, \dot{J}_{0II}$, – вектори задаючих струмів, відповідних ділянок мережі, обумовлених навантаженнями поїздів і зовнішньої системи електропостачання; \dot{Y}_I, \dot{Y}_{II} , – матриці повної вузлової провідності відповідних ділянок.

Спростивши вираз (4), множачи перше рівняння на \dot{K} зліва і складаючи з другим, одержимо $\dot{Y}_e \dot{E}_{\tau II} + \dot{J}_e = \mathbf{0}$, де $\dot{Y}_e = \dot{K}\dot{Y}_I\dot{K} + \dot{Y}_{II}$ – матриця пасивних параметрів еквівалентної схеми зовнішньої і тягової систем електропостачання; $\dot{J}_e = \dot{K}\dot{J}_{0I} + \dot{J}_{0II} - \dot{U}_\delta \dot{K}\dot{Y}_I\mathbf{n}$ – вектор активних параметрів еквівалентної схеми.

Напруги у вузлах з'єднання схем I і II і у виключених вузлах визначаються по формулах: $\dot{E}_{\tau II} = \begin{pmatrix} \dot{U}_\delta \mathbf{n} + \dot{U}_{\Delta e} \\ \dot{U}_\delta \end{pmatrix}$; $\dot{E}_{\tau I} = \dot{K}\dot{E}_{\tau II}$; $\dot{U}_{BI,II} = -\dot{Y}_{BB}^{-1}(\dot{Y}_{B\tau} \dot{E}_\tau + \dot{J}_b)$.

Знайдені параметри напруг можна використовувати для формування вектора \dot{E} і подальшого розрахунку по формулах (2) і (3) вектора струмів віток \dot{I}_B і втрат енергії ділянок тягового і зовнішнього електропостачання.

Проте таке рішення питання вимагає великої оперативної пам'яті, швидкодії ЕОМ і баз даних, що належать різним міністерствам і відомствам. Можна запропонувати і інший спрощений підхід, цілком допустимий для вирішення цілого класу задач тягового електропостачання – статистичне моделювання напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій.

У розділі також розроблені алгоритми декомпозиції і синтезу при розрахунку електротягових мереж постійного струму з живлячими фідерами 6, 12, 24 кВ, які дозволяють визначити ефективність режимів для різних схем живлення за умов транзиту потужності по тяговій мережі. Отримані результати розрахунку аварійного режиму у момент короткого замикання за відсутності і наявності на зоні навантажень поїздів для ЗСЕ, підсистеми 12 кВ і 3,3 кВ постійного струму, що дозволяє правильно оцінювати стійкість керованих тиристорних перетворювачів.

У третьому розділі розроблена спеціалізована імітаційна модель СТЕ (рис. 6) з урахуванням режимів роботи ЗСЕ, в основу якої покладений синтез матричного методу розрахунку миттєвих схем, методу розрахунку навантажень ЕРС, з використанням універсальних тягових характеристик і методу статистичних випробувань для врахування організації руху поїздів.

Особливу важливість при імітаційному моделюванні системи електропостачання грають навантаження поїздів. Від їх правильного визначення в значній мірі

залежить достовірність розрахунків. Як відомо, результати таких розрахунків залежать від фактичної напруги на пантографі електровоза. Розробці теорії тягових розрахунків були присвячені роботи Б.Д. Воскресенського, В.Е. Розенфельда і інших авторів, методи оптимізації тягових розрахунків розглянуті в роботах Г.Г. Марквардта, Д.А. Палей, Е.С. Почаєвця і інших. Вищезазначені роботи при постановці задачі оптимального управління поїздом не враховували умови ринкових відносин при яких основними показниками раціональності вибору потужності ЕРС доцільно вважати мінімум витрат енергоресурсів і часу на доставку вантажів. Саме з цих міркувань в роботах Г.К. Гетьмана рекомендуються універсальні тягові характеристики, які не залежать від маси состава і визначаються двома параметрами – розрахунковими підйомом і швидкістю V_p , а критерієм є питома витрата енергії на рух поїзда. Залежність $\bar{F}_k(V)$ – так звана гранична тягова характеристика визначається типом локомотива, а координати граничної тягової характеристики можна записати у вигляді $\bar{F}_k(V) = \min \{F_{\text{цн}}(V), F_k(V)\}$.

Запропонована структура інформаційного файлу електротягових навантажень у вигляді матриці TR , яка дозволяє легко сформувати вектор задаючих струмів поїздів \dot{J} . Для цього використовується імітаційний вектор F , значення кожного елемента якого показує номер стовпця матриці TR , а порядковий номер цього елемента – номер рядка матриці TR . Для раціональних режимів руху поїздів складаються інформаційні файли мічених вузлів (рис. 4) графа $G_{st} = (V_{st}, L_{st})$, а саме векторів MP (пасажирських) і MG (вантажних) вузлів імітації руху відповідно до швидкості типу поїзда. Імітація руху здійснюється шляхом зміни елементів вектора $F = (F_1, F_2, \dots, F_l, \dots, F_n)$. При необхідності код поїзда з вектора імітації руху F переписується в матрицю імітацій зупинок. Це дозволяє враховувати при розрахунку миттєвих схем струми електровоза на стоянках, пускові струми, навантаження станційних колій.

Запропоновано алгоритм вибору графіка руху поїздів (г.р.п.) по заданому електроспоживанню тягових підстанцій в умовах роботи залізниць на ОРЕ. Шляхом багатократного моделювання г.р.п. знаходять варіант, при якому із заданою погрешністю (2 – 4 %) математичні очікування і дисперсії електроспоживання енергооптимальних графіків і модельованих співпадають. Одержаний імовірнісний г.р.п. для всіх напрямів рекомендується при розробці річних г.р.п.

Перетоки потужності по тягових мережах в основному визначаються режимом роботи ЗСЕ. В деяких випадках перетоки потужності в лініях досягають величин, несумісних з надійністю цієї лінії або системи, і вимагають диспетчерського регулювання. Враховуючи, що повна витрата електроенергії тягової підстанції складається з витрати електроенергії на тягу поїздів, втрат і перетоків електроенергії по тяговій мережі, можна запропонувати формулу для визначення перетоку

$$W_{nep} = W - \Delta W - W_{mn} = \sum_{i=1}^T (I_{ni}^* \dot{U}_{ui} - \Delta S_i) - W_{mni} \quad , \quad (5)$$

де W – повна витрата електроенергії тягової підстанції; I_{ni}^* – спряжений комплекс миттєвих значень струмів плечей живлення; \dot{U}_{ui} – миттєве значення напруги; W_{mni} – витрата електроенергії на тягу поїздів.

Витрата електроенергії на тягу поїздів визначається таким виразом

$$W_{mn} = \sum_{j=1}^m W_j = \sum_{j=1}^m 2,725 \int_{S_{uj}}^{S_{kj}} F_k(S) \eta^{-1}(S) dS, \quad (6)$$

де W_j – витрата електроенергії i -го поїзда; m – кількість поїздів на міжпідстанційній зоні; z – к.п.д. електровоза; F_k – сила тяги електровоза.

Підставляючи значення W_{mn} у формулу (5) одержимо остаточний вираз для визначення перетоку електроенергії по тяговій мережі за час моделювання

$$W_{nep} = \sum_{i=1}^T (I_{ni}^* \dot{U}_{ui} - \Delta S_i) - 2,725 \sum_{j=1}^m \int_{S_{uj}}^{S_{kj}} F_k(S) \eta^{-1}(S) dS. \quad (7)$$

Вперше на базі єдиного імітаційного комплексу виконано моделювання режимів роботи СТЕ для вузлів з складною організацією руху поїздів і врахуванням режимів роботи енергосистем, що їх живлять. Це дозволяє враховувати необмежену кількість вагових категорій поїздів, їх стоянки, обгони, перетоки потужності по контактній мережі (рис. 7 і табл. 1). Встановлено, що протікання зрівняльних струмів приводить до підвищених втрат в тяговій мережі. Відсоток активних втрат збільшується на 1,22 % по відношенню до ідеального режиму і викликає необхідність переходу до консольних схем живлення.

Таблиця 1

Фідери тягових підстанцій	Середні струми фідерів, А	Ефективні струми фідерів, А	Витрати енергії, тис. кВА·г	Втрати енергії, кВА·г	Активні втрати, %
Варіант 1					
1	194 - j174	278	135 + j94	3380 + j7739	2,50
2	149 - j133	222	103 + j74	3494 + j7893	3,39
3	293 - j140	343	194 + j83	10083 + j21629	5,19
4	317 - j160	372	209 + j97	7385 + j17221	3,50
5	108 - j115	201	76 + j67	2020 + j4420	2,60
6	113 - j134	206	80 + j71	2200 + j4835	2,70
7	22 - j123	161	0 + j80	1677 + j3468	-
Сумарні по варіанту 1			797 + j566	30239 + j67205	3,70
Сумарні по варіанту 2			784 + j676	19440 + j43800	2,48
Сумарні по варіанту 3			784 + j676	25920 + j59120	3,31

Дослідження виконувались для трьох варіантів схем живлення. Варіант 1 – три підстанції працюють в паралель з потужностями: $S_x = 31,5$ мВ·А; $S_y = 40$ мВ·А; $S_z = 90$ мВ·А. Варіант 2 – три підстанції працюють в паралель; напруга на шинах 27,5 кВ не змінюється. Варіант 3 – консольна схема живлення складної схеми від трьох підстанцій; відключені пости секціонування. Для всіх трьох варіантів живлення підстанцій x , y , z здійснювалося по ЛЕП-110 кВ від різних енергосистем.

Результати розрахунків, виконані за умови моделювання напруги холостого ходу \dot{U}_{xx} тягових підстанцій як імовірної величини і приведені в табл. 1, для варіантів 2 і 3 співпадають. Дійсно, при роботі трьох підстанцій x , y , z в паралель і однако-

вих рівнях напруги на шинах 27,5 кВ, відмінностей в результатах розрахунку і бути не може, а при консольних схемах немає перерозподілу навантажень. Для варіанту 1 показники режиму СТЕ відрізняються від приведених на рис. 7, де режими ЗСЕ враховувалися шляхом імовірнісного моделювання \dot{U}_{xx} тягових підстанцій, від 2 до 10 %. Це підтверджує адекватність розроблених алгоритмів моделювання режимів роботи СТЕ з урахуванням режимів роботи енергосистем, що їх живлять.

Адекватність імітаційної моделі при розрахунку СТЕ постійного струму перевірялася на ділянці Сіверськ – Ново-Золотарівка Донецької залізниці. Випробування проводилися за затвердженою програмою з використанням сучасної бази, зокрема вагона випробувань контактної мережі (ВВКМ), сучасних мікропроцесорних лічильників для вимірювання витрат і втрат енергії. У нормальному режимі роботи вимірювалися рівні напруг в тяговій мережі при русі поїздів різної ваги в парному і непарному напрямі. З цією метою в состави з різною вагою включався ВВКМ, апаратура якого записувала рівні напруги (рис. 8).

Практично всі параметри показників для одноколіїної ділянки, одержані експериментально в нормальних і аварійних режимах (різниця 1,5 – 5 %) підтверджують теоретичні викладки і результати імітаційного моделювання (табл. 2). Вперше з використанням імітаційної моделі і експериментальних досліджень для ділянок постійного струму Донецької залізниці вибрані енергоекономічні режими роботи консольних ділянок, що дозволяють як мінімум в 2 рази понизити потенціали рейок перегонів і станцій і підвищити безпеку шляхом використання нових типів тягових підстанцій з мінімальною потужністю 1 МВт і роботою в автоматичному режимі при появі поїзда на фідерній зоні. При цьому річна економія втрат енергії для консольної ділянки завдовжки 16,8 км лежить в межах 15 – 40 тис. кВт·г в рік.

Таблиця 2

Добові показники	Одностороннє живл.	Двостороннє живл.
1. Витрата енергії, кВт·г	11108/20279	11108/20279
2. Втрати енергії, кВт·г	611,7/1808,6	204,3/604,3
3. Середні потенціали рейка - земля, В	48,1/91,2	15,9/31,4

Примітка: чисельник – при середніх розмірах руху, знаменник – при максимальних.

У четвертому розділі запропоновано підхід до реалізації енергозберігаючих технологій тягового електропостачання заліниць, що використовує нечіткі моделі і методи уявлення для аналізу і вибору управлінь. Запропонована і обґрунтована експертна система (ЕС) реалізації енергозберігаючих технологій роботи СТЕ, що дозволяє підвищити енергетичну ефективність дій шляхом поєднання евристичних, ретроспективних і каузальних знань в локальних і глобальних системах управління пристроями електропостачання (рис. 9).

Рядки матриці режимів (*МР*) СТЕ є станами, які характеризують об'єкти СТЕ $X_i = (X_{i1}, \dots, X_{in})$ набором параметрів x_{ij} , $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, n$. Задача побудови оптимальної класифікації *МР* полягає у виборі групи параметрів G_k , $k = 1, \dots, g$, і класу об'єктів T_{rk} , $r = 1, \dots, t_k$, в кожній G_k , для пари елементів (G_k^*, T_{rk}^*) , на якій мінімізується заданий функціонал $F(G, T)$ відстаней елементів від "центрів" класів T_{rk} .

Одержали розвиток дві форми правил продукцій, призначені для оцінки мінімізації перетоків потужності і втрат енергії в тяговій мережі:

$$\text{IF}[\text{AND}(N_k = g_r)]\text{THEN}[y_j \in N_F; (\bar{Y}_j, \sigma_j^2)]; \text{IF AND}_{\substack{k \in q^* \\ j \in G_k}}[\text{OR}(x_{ij} \approx x_j^*)]\text{THEN}[(y_j \approx y^*)], \quad (8)$$

де AND і OR – знаки логічних операцій; g_r – номери груп G_k з класами N_k , до яких можуть бути віднесені параметри об'єктів; y_j – прогнозований параметр режиму СТЕ для i -го об'єкту $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$; N_F – виділені фінальні класи; (\bar{Y}_j, σ_j^2) – середні значення і дисперсії змінних-висновків; знак “ \approx ” показує на "приблизну рівність"; x_j^* , y^* – отримані з підтаблиць значення елементів баз знань (БЗ).

При формуванні правил (8) передбачається, що є можливість завдання змінної-висновку до побудови класифікації. Функціонал якості класифікації при цьому матиме наступний вигляд

$$F(G, T) = \frac{1}{N \cdot n} \sum_{k=1}^q \sum_{r=1}^{t_r} [F_{rk}(G, T) * W_{rk}^{-1}] \Rightarrow \min_{(G, T) \in \pi}, \quad (9)$$

де $F_{rk}(G, T)$ – розрахункові міри розсіяння елементів $W_{rk} = |G_r| \cdot |I_{rk}|$, I_{rk} – множина номерів об'єктів підматриць T_{rk} .

Пропонується наступна форма правил перетворення результатів умовної класифікації даних в БЗ експертних систем

$$\text{AND}_{s \in q^*}[\text{OR}_{j_k \in K}(\text{OR}(x_{ijk}^s \approx w_{jk}^s), \text{B}(x_{(i)} : j_i \notin K) \geq B_*^s)] \Rightarrow (y_{ij_G} \approx w_{j_G}^*), \quad (10)$$

де $j_i \notin K$ – сукупність змінних, що визначають досліджуваний об'єкт $x_{(i)} = \{x_{ij_k}, x_{ij}\}$; B_*^s – порогові значення для порівняння близькості об'єктів по змінним, що становлять групу G_s ; індекси ‘ i ’ показують характеристики ‘ j_k ’ ситуації ‘ i ’ при зіставленні із заданими значеннями $w_{j_k}^*$; індекси ‘ k ’, ‘ j_G ’ показують номери заданих опорних змінних $k, j_G \in K = \bigcup j_s$, де номер j_G показує прогнозовану характеристику $w_{j_G}^*$.

При формуванні правил встановлені такі параметри: DQ_i – відхилення добової маси перевезених вантажів на i -й міжпідстанційній зоні двоколіїної ділянки змінного струму, для характеристики якої введені значення нечітких величин Q_p : «відставання (сильне, слабке, відсутнє)» і «випередження (відсутнє, слабке, сильне)»; DS_i – відхилення добових активних втрат енергії для міжпідстанційної зони i , величина S_p із значеннями: «сильне, відсутнє, слабке»; DW_i – різниця добових витрат енергії i -ої міжпідстанційної зони, для реального режиму роботи СТЕ і еталонного режиму рівномірного завантаження СТЕ, величина W_p ; K_i – ділянка колії, величина K_p , де $i = 0, 1.. n$ – кількість міжпідстанційних зон заданої ділянки. Нечіткі правила мають вигляд

$$\text{IF}(K_i \in K_p \text{ AND } DW_i \in W_p \text{ AND } DQ_i \in Q_p \text{ AND } DS_i \in S_p)\text{THEN } U_i \text{ AND } Cx_i, \quad (11)$$

де U_i – напруги тягових підстанцій, які забезпечують управління близьке до оптимального на i -й міжпідстанційній зоні ділянки; Cx_i – схема живлення зони.

При побудові моделі управління у вигляді нечітких правил кожна нечітка характеристика апроксимується N нечіткими величинами з трикутними функціями приналежності. Для нечіткої характеристики задані мінімальне і максимальне значення інтервалу, в яких знаходяться її допустимі значення. Апроксимуючі величини мають трикутний ступінь приналежності: вершина лежить в центрі, їй відповідає ступінь приналежності 1, а дві інші вершини по сторонах від неї із ступенями приналежності 0. Нечіткий висновок ґрунтується на правилі нечіткої імплікації Мамдани.

Функція приналежності (рис. 10) нечіткої величини різниці добових витрат енергії реального і еталонного режиму роботи СТЕ характеризується: $DW_{\min} = 32$ тис. кВт·г, $DW_{\max} = 30$ тис. кВт·г. Назви кожного значення дані таким чином: значення близько 0 називаються « DW_n » (немає відхилення), « $+DW_1$ » – « $+DW_6$ », « $-DW_1$ » – « $-DW_6$ » – нечіткі відхилення відповідно до DW_{\max} та DW_{\min} класів 1...6.

При формуванні бази правил кожне значення з вибірки еталонних режимів тяги зіставляється із значеннями нечіткої характеристики і замінюється таким, яке має максимальний ступінь приналежності серед всіх заданих в області. Якщо значення відхилень $DW_i = 8000$ кВт·г, $DQ_i = -50$ тис.т і $DS_i = 300$ кВт·г тоді одержимо таке правило

IF ($DW_i \in \langle DW_n \rangle$ AND $DQ_i \in \langle -DQ_2 \rangle$ AND $DS_i \in \langle +DS_4 \rangle$) THEN $U_i \geq 27,5$ AND CxK_i ,

де « $-DQ_2$ » – слабке випередження по перевезеній добової масі класу 2; « $+DS_4$ » – сильне відхилення добових активних втрат класу 4. Це значить, що треба перейти на консольну схему живлення тягової мережі і підтримувати напругу на шинах підстанцій такою, яка забезпечить допустиму норму 21 кВ для ЕРС.

Найважливішою задачею є реалізація енергозберігаючих технологій при нарощуванні вантажопотоків в умовах високих темпів розвитку економіки країни. В роботі встановлено, що найбільш ефективними є два способи інтенсифікації процесу перевезень: збільшення вантажообігу шляхом застосування великовагового руху із збереженням кількості пар поїздів заданого напрямку (I) і збільшення кількості пар поїздів з вибраними енергооптимальними масами поїздів (II). Перший спосіб може бути ефективним за рахунок різкого зниження вартості електроенергії, якщо пропускати великовагові поїзди в нічний час. Другий спосіб рівномірно завантажує тягові мережі, що, безумовно, знижує втрати енергії.

Імітаційне моделювання здійснювалося для реальної фідерної зони змінного струму з підвіскою ПБСМ 70 + МФ 100, рейками Р65, відношенням часу ходу поїзда до часу його ходу під струмом 1,2 – 1,8 по непарному і 1 – 1,15 по парному шляху, напругою на шинах підстанцій $27,5 \pm 1,5$ кВ. Інтенсифікація перевезень імітувалася шляхом заміни поїздів масою 4 тис.т великоваговими від 6 тис.т до 36 тис.т.

Результати аналізу графіків електроспоживання для різних вантажопотоків (табл. 3) дозволяють зробити висновок про нерівномірність електроспоживання тягових підстанцій. Зниження нерівномірності можливо за рахунок регулювання районного навантаження та напруги тягових підстанцій, застосування раціональних мас і інтервалів між поїздами в річних графіках руху поїздів.

Параметри тягового навантаження міжпідстанційних зон

№ вар.	Добовий вантажо-потік, тис. тонн	Середня активна і реактивна потужність та середньо квадратичне відхилення, в хвилину				Середні активні і реактивні втрати потужності, в хвилину	
		W_a , кВт	σ_{W_a} , кВт	W_p , квар	σ_{W_p} , квар	ΔW_a , кВт	ΔW_p , квар
1	391,5	121/365	63/111	96/288	44/75	2,0/6	4,3/13
2	487,5	141/422	108/172	106/318	80/137	3,3/10	7,6/23
3	891,5	214/641	92/256	156/470	85/199	6,3/19	14/42

Примітка: У чисельнику для однієї зони, в знаменнику для трьох.

За наслідками експерименту на імітаційній моделі одержані залежності добових активних і реактивних витрат і втрат енергії, відсотка активних втрат залежно від сумарної маси вантажів, що пересувається, по ділянці (рис.11).

Збільшення маси, що перевозиться по двоколійній ділянці, з 400 тис.т до 700 тис.т в добу при різних способах реалізації графіка руху поїздів і інтенсифікації їх ваги приводить до істотно різних втрат енергії. При ритмічному графіку і відповідних типах поїздів втрати енергії знижуються мінімум в 3 рази. Застосування ж схем паралельного з'єднання контактних підвісок при інтенсифікації перевезень дозволить зменшити активні втрати енергії на 8 – 15 %, а реактивні на 7 – 11 %.

ВИСНОВКИ

Виконані в дисертації дослідження і розробки присвячені рішенням науково-практичної задачі – розробці комплексу науково-обґрунтованих пропозицій, умов і заходів, що забезпечують реалізацію енергозберігаючих режимів роботи систем тягового і зовнішнього електропостачання залізниць. Основні наукові і практичні результати дисертаційної роботи полягають в наступному:

1. В умовах необхідності енергозбереження і зниження собівартості перевезень на електрифікованих лініях залізниць найбільший ефект (від 5 до 15 %) досягається шляхом впровадження комплексних інформаційних технологій, які базуються на раціональних по показнику вартості електроенергії тарифах, компромісно-оптимальних режимах тяги поїздів і раціональних по перетокам потужності режимах роботи тягового і зовнішнього електропостачання.

2. Узагальнені способи формування і перетворення графів схем тягового електропостачання і живлячих їх енергосистем і запропонований уточнений метод розрахунку складних миттєвих схем, що в значній мірі підвищує точність розрахунку (особливо перетоків потужності по тягових мережах до 1 – 2 %), скорочує витрати часу на підготовку початкової інформації і час на процес самих розрахунків.

3. Розроблені алгоритми і імітаційні моделі систем тягового і зовнішнього електропостачання з складними схемами живлення в основу яких покладений синтез матриць і графів при розрахунку миттєвих схем і імовірнісних методів рухомих навантажень залізниць і стаціонарних навантажень енергосистем (районні підстанції, заводи). Створений єдиний імітаційний комплекс для вузлів з складною організацією руху поїздів, що дозволяє враховувати необмежену кількість типів поїздів, їх

стоянки, обгони, перетоки потужності по контактній мережі, роботу компенсуючих і вольтодобавочних пристроїв. Відмінності між різними параметрами, одержаними на імітаційних моделях і експериментально на діючих ділянках, лежать в межах 1,5 – 5 %, що підтверджує адекватність імітаційного моделювання і дозволяє вирішити задачу накопичення баз даних енергозберігаючих режимів.

4. Вдосконалена експертна система прийняття рішень при регулюванні режимів роботи систем тягового і зовнішнього електропостачання, що дозволяє підвищити енергоекономічну ефективність і оперативність прийняття рішень при неповній або суперечливій інформації. Розроблені принципи формування алгоритмів і наповнення баз даних і знань експертних систем і вирішені задачі забезпечення енергозберігаючих режимів роботи систем тягового електропостачання в умовах функціонування оптового ринку електроенергії.

5. На основі імітаційного моделювання і проведених експериментів встановлено, що при малих вантажопотоках і великих перетоках енергії економічно вигідними для залізниць можуть виявитися консольні схеми живлення. Рекомендований на основі виконаних досліджень перехід до консольних схем живлення тягових мереж змінного струму дозволяє понизити сумарне електроспоживання тягових підстанцій приблизно на 2 – 5 %. Створена і реалізована у вигляді комп'ютерної програми «МСП» методика оцінки економічної доцільності схем живлення, що враховує регресійну залежність між питомою витратою енергії на тягу і обсягом перевезень. Впроваджені рекомендації дозволили заощадити близько 25 тис. кВт·г на 1 км двоколійної ділянки.

6. Встановлено, що збільшення маси, що перевозиться по двоколійній ділянці, з 400 тис.т до 700 тис.т в добу при різних способах реалізації графіка руху поїздів і інтенсифікації їх ваги приводить до істотно різних втрат енергії. При ритмічному графіку і відповідних типах поїздів втрати енергії знижуються мінімум в 3 рази. Дано пропозиції по зниженню втрат енергії в 1,5 – 2 рази за умови реалізації рівномірного графіка руху поїздів і раціональних режимів роботи тягових мереж, що їх живлять.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджені на підприємствах Укрзалізниці і в рекомендаціях для країн ОСЗ, зокрема: рекомендації по забезпеченню енергооптимального процесу перевезень на основі інформаційних технологій управління системами електричної тяги (затверджені V комісією ОСЗ м. Сенограби, Чеська республіка, 2003 р.); методичні вказівки щодо визначення норм витрати електроенергії для стаціонарних споживачів залізниць (затверджені наказом Укрзалізниці №545-Ц у від 28.12.2006 р.); методика оцінки техніко-економічної доцільності схем живлення. Методика, алгоритми і програми електротехнічних розрахунків використовуються при проектуванні електрифікованих ліній в Київдіпротрансі, а алгоритми наповнення баз даних і знань експертних систем прийняття рішень - при регулюванні режимів роботи систем електричної тяги в системах управління Придніпровської залізниці. Економічний ефект від їх впровадження складає 75,8 тис. грн. у рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Доманский В.Т., Андреевских А.В., Доманская Г.А. Расчет системы электропитания участков разных номинальных напряжений // Вестник ВНИИЖТ. – М. – 1990. – №2. – С. 19-23.

Здобувачем запропонована математична модель розрахунку складних схем тягового електропостачання з урахуванням енергосистем, що їх живлять.

2. Доманский В.Т., Блохин В.Ф., Доманская Г.А. Экспериментальное определение потерь энергии в электротяговых сетях постоянного тока // Вестник ВНИИЖТ. – М. – 1990. – №5. – С. 29-32.

Здобувачем виконані розрахунки втрат енергії на моделі та обробка експериментальних досліджень.

3. Доманский В.Т., Данилов А.А., Доманская Г.А. Учет и оптимальное управление электропотреблением тяговых подстанций // Автоматизированные системы электропитания железных дорог: Межвузовский тематический сборник. – Ростов-на-Дону: РИИЖТ. -1990. – С. 5-12.

Здобувачем розроблені алгоритми побудови схем обліку електроенергії для ЕОМ енергодиспетчерського пункту.

4. Бурков А.Т., Доманский В.Т., Доманская Г.А. Графы электротяговых сетей // В кн.: Повышение надежности и эффективности полупроводниковых преобразователей в устройствах электрических железных дорог / Межвуз. темат. сборник, ЛИИЖТ. – Л. – 1992, вып. 5. – С. 3 – 25.

Здобувачем розроблені алгоритми виділення дерева графа для складних схем тягових мереж.

5. Бурков А.Т., Доманский В.Т., Доманская Г.А., Кирилов К.Е. Имитационная модель системы электропитания постоянного тока с питающей линией 12 кВ // Вестник ВНИИЖТ. – М. – 1993. – №2. – С. 35-39.

Здобувачем запропоновано методику декомпозиції і синтезу при розрахунку схем.

6. Саенко Н.Н., Бурков А.Т., Доманский В.Т., Ковбаса Б.А., Доманская Г.А. Интегрированная система АРМ службы и дистанций электропитания на основе персональных компьютеров и программируемых контроллеров // Повышение эффективности работы устройств электрического транспорта. – Днепропетровск. – 1993. – С. 93-97.

Здобувачем сформульовані вимоги до побудови систем управління режимами тягового електропостачання.

7. Скалозуб В.В., Цейтлин С.Ю., Великодний В.В., Андрищенко В.А., Доманская Г.А., Зеленский Ю.И. Объектно-ориентированные модели нестационарных стохастических потоков в транспортных сетях // Системні технології. – Днепропетровск. – 2001. – С. 141 - 150.

Здобувачем виконана математико-статистична обробка баз даних і баз знань.

8. Корниенко В.В., Доманская Г.А. Методы расчета и моделирования режимов работы систем тягового электропитания и питающих их энергосистем // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харків. – 2007. – № 5/3 (29). – С. 31 – 37.

Здобувачем виконані розрахунки витрат і втрат енергії в системі тягового електропостачання при зміні вантажопотоків.

9. Доманская Г.А. Энергосберегающие технологии управления режимами работы тягового электроснабжения // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2007. – №36. – С. 114-120.

10. Доманская Г.А. Оценка перетоков мощности и выбор энергосберегающих схем питания // Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут”. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2007. – №37. – С. 106-110.

11. Многоканальное устройство для измерения электрической энергии: А.с. 1762253 СССР / Доманский В.Т., Данилов А.А., Андреевских А.В., Доманская Г.А., Куркуль А.В.; Заявлено 03.01.90; Опубл. 15.09.92, Бюл. №34. - 7 с.

Здобувачем розроблені алгоритми побудови баз даних електроспоживання тягових підстанцій.

12. Устройство для телеизмерения и телесигнализации тяговых подстанций электрифицированных железных дорог: А.с. 1716453 СССР / Доманский В.Т., Данилов А.А., Андреевских А.В., Доманская Г.А.; Заявлено 13.09.89; Опубл. 29.02.92, Бюл. №8. - 7 с.

Здобувачем розв’язана тестова задача по розрахунку обсягу інформації електроспоживання дистанцій електропостачання.

13. Корниенко В.В., Карпенко С.Я., Блохин Е.П., Доманский В.Т., Скалозуб В.В., Доманская Г.А. Задачи железных дорог Украины как субъекта оптового рынка электроэнергии // Материалы второго международного симпозиума «Электрификация и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте» (Eltrans-2003). - С.-Петербург. -2003. - С. 399-407.

Здобувачем наведено технічні рішення, що застосовані в експертній системі управління режимами роботи тягового електропостачання.

14. Скалозуб В.В., Карпенко С.Я., Доманская Г.А. Методы повышения эффективности работы систем электрической тяги в условиях оптового рынка электроэнергии Украины // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Энергоэффективность’2004». - Одесса. - 2004. - С. 212.

Здобувачем запропоновано методи управління режимами роботи тягових мереж на основі нечіткого опису їх станів.

15. Доманская Г.А. Информационные технологии анализа и регулирования электропотребления тяговых сетей // Тезисы 65 Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта». - Днепропетровск. - 2005. - С. 130 - 131.

16. Доманская Г.А. Совершенствование методов расчета систем тягового электроснабжения // Материалы международной научно-технической конференции «Наука, инновации, образование: актуальные проблемы развития транспортного комплекса России». - Екатеринбург. - 2006. - С. 142 – 143.

17. Доманская Г.А. Энергосберегающие технологии тягового электроснабжения железных дорог с учетом режимов работы питающих их энергосистем // Тезисы докладов четвертого международного симпозиума «Электрификация и организация

скоростных и тяжеловесных коридоров на железнодорожном транспорте» (Eltrans'2007). - С.-Петербург. -2007. - С. 35 – 36.

АНОТАЦІЯ

Доманська Галина Анатоліївна. Енергозберігаючі технології тягового електропостачання залізниць з урахуванням режимів роботи живлячих їх енергосистем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.22.09 – електротранспорт. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”. – Харків, 2008.

Дисертація присвячена дослідженню та розробці енергозберігаючих технологій тягового електропостачання залізниць з урахуванням режимів роботи живлячих їх енергосистем.

Виконано системний аналіз вітчизняних і зарубіжних систем електротяги, обґрунтована і запропонована концепція їх розвитку, що забезпечує ресурсо- і енергозбереження. Розроблено методи розрахунку і моделювання тягового електропостачання, які враховують нерозривний взаємозв'язок з живлячими енергосистемами і дозволяють порівняно з існуючими методами підвищити точність розрахунку параметрів і вибрати раціональні режими з мінімальними перетоками потужності і втратами енергії.

Запропоновано спосіб регулювання режимів роботи електротягових мереж, на базі нечітких моделей і методів управління. Дано пропозиції по зниженню втрат енергії в 1,5 – 2 рази за умови реалізації рівномірного графіка руху поїздів і раціональних режимів роботи тягових мереж і енергосистем, що їх живлять.

Ключові слова: система тягового електропостачання, технології енергозбереження, режими роботи, перетоки потужності, втрати енергії, методи і моделі.

АННОТАЦИЯ

Доманская Г. А. Энергосберегающие технологии тягового электроснабжения железных дорог с учетом режимов работы питающих их энергосистем. – Рукопись.

Диссертация на получение ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.22.09 – электротранспорт. – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”. – Харьков, 2008.

Диссертация посвящена исследованию и разработке энергосберегающих технологий тягового электроснабжения железных дорог с учетом режимов работы питающих их энергосистем.

Выполнен системный анализ отечественных и зарубежных электротяговых систем, обоснована и предложена концепция их развития, обеспечивающая ресурсо- и энергосбережения. Установлена необходимость рассмотрения неразрывной взаимосвязи систем тягового и внешнего электроснабжения при определении энергосберегающих режимов и параметров. Показана динамика изменения удельного расхода электроэнергии во взаимосвязи факторов прироста грузооборота. Установлены факторы, влияющие на электрическую нагрузку будущих высокоскоростных линий.

Разработаны методы расчета и моделирования тягового электроснабжения, которые учитывают неразрывную взаимосвязь с питающими энергосистемами и позволяют в сравнении с существующими методами повысить точность расчета параметров и выбрать рациональные режимы с минимальными перетоками мощности и потерями энергии.

Научно обоснована эффективность использования информационных технологий реализации энергосберегающих режимов работы систем тягового электроснабжения, заключающаяся в комплексном решении взаимосвязанных задач: рациональных по показателю стоимости электроэнергии тарифах, компромиссно-оптимальных режимах тяги поездов и рациональных по перетокам мощности режимах работы тягового и внешнего электроснабжения.

Создан единый имитационный комплекс для узлов со сложной организацией движения поездов, позволяющий учитывать неограниченное количество типов поездов, их стоянки, обгоны, перетоки мощности по контактной сети, работу компенсирующих и вольтодобавочных устройств.

Предложена и обоснована экспертная система реализации энергосберегающих технологий и методика автоматизированного формирования баз знаний для выбора энергосберегающих режимов работы электротяговых сетей. Для обеспечения энергосберегающих режимов работы электротяговых сетей с учетом питающих их энергосистем построена база нечетких правил, которая позволяет энергодиспетчеру выбрать уровни напряжений на шинах тяговых подстанций и схемы питания тяговых сетей минимизирующие перетоки мощности и потери энергии в тяговой сети.

Разработана методика технико-экономической целесообразности схем питания тяговых сетей и возможности перехода на консольные схемы питания или петлевые с пунктами параллельного соединения. Внедренные рекомендации позволили сэкономить порядка 25 тыс. кВт·ч на 1 км двухпутного участка.

Показаны пути рационального электропотребления в процессе интенсификации перевозок на электрифицированных линиях по критерию минимальных потерь в тяговой сети. Даны предложения по снижению потерь энергии в 1,5 – 2 раза при условии реализации равномерного графика движения поездов и рациональных режимов работы тяговых сетей и питающих их энергосистем.

Разработанные технологии совершенствования режимов работы электротяговых систем вошли в рекомендации по обеспечению энергооптимального процесса перевозок на основе информационных технологий управления системами электрической тяги для стран Организации сотрудничества железных дорог (г. Сенограбы, Чешская республика, 2003 г.).

Методика, алгоритмы и программы электротехнических расчетов используются при проектировании электрифицированных линий в Киевгипротрансе, а алгоритмы наполнения баз данных и знаний экспертных систем принятия решений - при регулировании режимов работы систем электрической тяги в интегрированных системах управления железных дорог.

Ключевые слова: система тягового электроснабжения, технологии энергосбережения, режимы работы, перетоки мощности, потери энергии, методы и модели.

SUMMARY

Domans'ka G. A. Energy-saving technologies of hauling electrosupply of railways taking into account the modes of operations of grids feed-ins them. – Manuscript.

Dissertation on competition of a scientific degree of the engineering science candidate on a specialty 05.22.09. – electric transport. – National Technical University “Kharkivskiy polytechnichniy institut”. – Kharkiv, 2008.

Dissertation is devoted to research and development energy-saving technologies of hauling electrosupply of railways taking into account the modes of operations of grids feed-ins them.

The systems analysis of the domestic and foreign electro traction systems is executed, grounded and offered conception of their development, providing the energy-savings. The methods of calculation and design of hauling electrosupply, which take into account indissoluble intercommunication with feed-ins grids and allow by comparison to existent methods to promote exactness of calculation of parameters and to choose the rational modes with the minimum crossflows of power and losses of energy, are developed.

The method of adjusting of the modes of operations of electro traction networks is offered on the base of unclear models and management methods. Suggestions are given on the decline of losses of energy in 1,5 – 2 times on condition of realization of even train and rational modes of operations of hauling networks and grids feed-ins them table.

Keywords: system of hauling electrosupply, technologies of energy-savings, office hours, crossflows of power, losses of energy, methods and models.