

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

На правах рукопису

БОСИЙ ДМИТРО ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 621.331:621.31.03

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

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт

ДИСЕРТАЦІЯ
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Науковий консультант –
доктор технічних наук, професор
Сиченко Віктор Григорович

Дніпро – 2017

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. СТАН ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ. МЕХАНІЗМИ ЕФЕКТИВНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	20
1.1 Ефективність функціонування транспортного сектору держави.....	20
1.2 Шляхи підвищення ефективності електроенергетичних систем	28
1.3 Необхідні передумови для розвитку інтелектуальних технологій в електроенергетиці	37
1.4 Систематизація методів розрахунку режимів електропостачання систем електричної тяги	43
1.5 Розвиток технологій енергоефективного електропостачання електрифікованих залізниць.....	48
1.6 Висновки до розділу 1. Постановка задач дослідження	62
2. МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З УРАХУВАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КЕРОВАНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ТЯГИ	64
2.1. Фізичні процеси споживання електричної енергії в системах тягового електропостачання	65
2.2. Обґрунтування необхідності та припущень розроблюваної моделі. Постановка задачі.....	67
2.3. Методика розрахунку миттєвих схем для систем підтримання постійної потужності	70
2.4. Оцінка точності методів розрахунку.....	86
2.5. Електричний розрахунок систем тягового електропостачання в просторово-часових координатах.....	88
2.6. Узагальнення та систематизація розроблених методів.....	99
2.7. Особливості розрахунку розподілених систем тягового електро- постачання.....	109
2.8. Висновки до розділу 2	117
3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРО- ПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО ТА ЗМІННОГО СТРУМУ	120
3.1. Методологія проведення експериментальних досліджень.....	120
3.2. Системна оцінка показників якості електроенергії двох систем електричної тяги.....	126
3.3. Оцінка режимних перетікань потужності	146

3.4. Оцінка адекватності розробленого методу розрахунку на підставі експериментальних даних	168
3.5. Аналіз енергетичних складових, зумовлених спотвореннями синусоїдності	171
3.6. Висновки до розділу 3	187
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ НАПРУГИ НА СИСТЕМУ ОБЛІКУ ТА ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	190
4.1. Особливості електроспоживання тяговими підстанціями постійного струму	190
4.2. Баланс електричної енергії тягових підстанцій постійного струму при роботі за несиметричної первинної напруги	191
4.3. Виробничо-економічні аспекти експлуатації систем обліку електроенергії	199
4.4. Дослідження роботи електронних лічильників при заниженій якості електроенергії	204
4.5. Висновки до розділу 4	211
5. НАУКОВІ ОСНОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РЕЖИМОМ НАПРУГИ В СИСТЕМІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	213
5.1 Постановка задачі.....	213
5.2 Принципи визначення керуючої послідовності впливів для пунктів підсилення тягової мережі.....	214
5.3 Розподілена система синхронних вимірювань електричних величин	225
5.4 Дослідження можливості застосування штучних нейронних мереж до визначення керуючої послідовності впливів.....	233
5.5 Висновки до розділу 5	238
6. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ ШЛЯХОМ УЗГОДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ СИСТЕМИ ЗОВНІШНЬОГО І ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	240
6.1. Постановка задачі.....	240
6.2. Особливості протікання електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання змінного струму	241
6.3. Взаємодія системи тягового з системою зовнішнього електропостачання	248
6.4. Забезпечення паралельної роботи тягових підстанцій змінного струму в умовах транзитних перетікань потужності	256

6.5. Методика розрахунку оптимальної потужності пристроїв компенсації реактивної потужності	266
6.6. Висновки до розділу 6	269
7. ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ	272
7.1. Комп'ютерно-інтегрована система електричної тяги	272
7.2. Техніко-економічне обґрунтування варіантів удосконалення системи електричних вимірювань для тягових підстанцій	288
7.3. Оцінка економічної ефективності застосування системи стабілізації напруги в контактній мережі	296
7.4. Висновки до розділу 7	301
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	302
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	306
ДОДАТОК А. РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ МОДЕЛІ В ПАКЕТІ МАТНСКАД	330
ДОДАТОК Б. ПРОГРАМИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	356
ДОДАТОК В. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ	387

ВСТУП

Актуальність теми

Транспортна інфраструктура будь-якої розвиненої країни відіграє важливу роль в економічному, соціальному та стратегічному значеннях. Українські залізниці мають в своєму розпорядженні близько 22 тис. км та забезпечують до 80 % вантажних і до 50 % пасажирських перевезень [1]. Перевезення залізничним транспортом в енергетичному балансі України займають частку споживання електроенергії на рівні 4 %, при цьому від 2,8 до 3,5 % загального балансу електроенергії безпосередньо витрачається на електричну тягу [2]. За всю історію експлуатації залізничного транспорту в Україні частка електрифікованих залізниць із загальної експлуатаційної довжини залізничних колій постійно збільшується, складаючи на цей час близько 10 тис. км, що у відношенні до загальної експлуатаційної довжини складає 47 % [3]. Постійне збільшення протяжності електрифікованих залізниць протягом останніх років обумовлене перевагами, які полягають у тому, що питомі витрати електричної тяги менше від тепловозної у 1,8-2,2 рази [2].

За обсягами вантажних перевезень залізниці України посідають четверте місце на Євразійському континенті, поступаючись лише залізницям Китаю, Росії та Індії. При цьому, вантажонапруженість залізниць України в 3-5 разів перевищує відповідний показник розвинених європейських країн [1]. Історично так склалось, що в Україні застосовується два види електричної тяги – постійного та змінного струму, що створює технічні складності при експлуатації та перепони у широкому впровадженні високошвидкісного руху та збільшенні обсягів вантажних перевезень.

На даний час залізниці України представлені шістьма суб'єктами господарювання, які володіють залізничною інфраструктурою та розподілені за територіальним принципом, а саме Львівська, Південно-Західна, Одеська, Південна, Донецька, Придніпровська залізниці та інші підприємства і організації єдиного виробничого-технологічного комплексу, що забезпечують перевезення вантажів і пасажирів. На межах розділу експлуатаційної діяльності

залізниць виникають спірні питання, пов'язані з особливістю споживання електричної енергії електрорухомим складом, недосконалістю системи обліку електричної енергії та режимами напруги в системі електропостачання.

Електричну енергію залізниці отримують з оптового ринку електроенергії, використовуючи при її передачі до тягових підстанцій електричні мережі суміжних ліцензіатів, які підпорядковані адміністративно-територіальному поділу. У зв'язку з цим, в межах залізниць та декількох суміжних ліцензіатів оптового ринку електроенергії додатково виникають проблеми, пов'язані з режимами електропостачання.

Безпосередньо для електротягового рухомого складу відхилення режиму напруги від нормальних умов обмежують провізну і пропускну спроможності, викликають невиправдані втрати електроенергії в тягових мережах та, в цілому, ускладнюють виробничо-господарську діяльність електрифікованих залізниць. Так, на ділянках постійного струму фактична величина напруги, в першу чергу, обмежує технологічну можливість пропуску заданої кількості електрорухомого складу і перевезення встановленої вагової норми, що визначаються за умовами безпеки руху. Для ділянок, електрифікованих змінним струмом, окрім зазначеного вище, відмінності у модулях та кутах зсуву фаз напруг призводить до виникнення транзитних перетікань потужності. В таких випадках для електроенергії, закупленої на одній тяговій підстанції, створюються умови перетікання транзитом тяговою мережею і передачі районним споживачам іншої підстанції або, навіть, в первинну мережу. А оскільки на підставі діючих договірних відносин грошових компенсацій за транзитні перетоки суміжні ліцензіати оптового ринку не виконують, тому виникає надлишок закупленої електроенергії, який погіршує фінансово-економічні показники роботи залізниць та в окремих випадках зумовлює створювати додаткове секціонування контактної мережі, що технологічно порушує нормально встановлені схеми живлення.

Енергоефективність функціонування електрифікованих залізниць прийнято оцінювати рівнем технологічних втрат в пристроях електропоста-

чання. За умови відсутності автоматизованої системи обліку електроенергії на тягу поїздів, залізницями періодично проводяться експерименти по визначенню технологічних втрат в тяговій мережі, які для залізниць змінного струму складають 5-8 %, для постійного – 14-17 %, а в окремих випадках – до 24 % [2]. Через те, що в загальноенергетичному балансі України втрати електроенергії при її передачі та транспортуванні оцінюються на рівні 11 % [4], а прийнятним рівнем європейські країни вважають 6-8 % [5-6], можна зробити висновок, що система електричної тяги постійного струму має відносно низьку ефективність та нездатна за рівнем втрат конкурувати з системою змінного струму і, як наслідок, в загальнодержавному енергетичному балансі погіршує статистичні показники роботи транспортного сектору.

Перевезення електричним транспортом, незважаючи на вказані факти, в умовах нестійкої вартості енергоносіїв завжди виявляються найбільш рентабельними через закладену можливість диверсифікації виду первинних енергетичних ресурсів. Попри це, на всьому шляху транспортування електроенергії від джерела до кінцевого споживача будуть наявні втрати деякої її частини, що є технологічно необхідним для забезпечення загального процесу передачі. З урахуванням того, що з кожною наступною ланкою передачі електроенергії накопичується рівень її втрат, то найбільшої актуальності набуває проблема зниження втрат та підвищення ефективності безпосередньо для кінцевого споживача електроенергії, який для електрифікованого залізничного транспорту є просторово-розподіленим та постійно змінюється у часі.

Розпочата експлуатація на залізницях України сучасного швидкісного рухомого складу наочно показала проблеми та обмеження, які містяться в інфраструктурі залізниць. В частині режиму електропостачання це стосується технічних обмежень за величиною та постійною часу споживання тягової потужності. Окрім цього, поступове впровадження інтелектуально керованих джерел альтернативної енергетики, в тому числі, і з приєднанням до тягових мереж, з одного боку викликає проблеми неузгодженості режимів їх роботи,

а з іншого відкриває нові можливості у пошуку оптимальних розподілів потоків потужностей при живленні систем електричної тяги.

Таким чином, забезпечення енергоефективних режимів електропостачання в сучасних умовах експлуатації електрифікованих залізниць є актуальною проблемою і потребує наукового вирішення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана відповідно до таких державних програм:

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

2) Енергетична стратегія України на період до 2030 р., схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071 від 24.07.2013, в частині:

- розвитку електроенергетичної галузі;
- розширення пропускної спроможності залізничних коридорів.

3) Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, ухвалена Постановою Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р. (із змінами, внесеними згідно з Постанови № 970), в частині

- підвищення конкурентоспроможності залізничного транспорту на внутрішньому і зовнішньому ринку транспортних послуг;
- зменшення обсягу питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів;

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

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

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

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

- «Розробка систем енергопостачання об'єктів залізничного транспорту з використанням новітніх схемних і проектних рішень», № держреєстрації 0111U009393;
- «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії та дослідження балансу електричної енергії в умовах спотворення її якості на тягових підстанціях постійного струму», № держреєстрації 0113U007949;
- «Дослідження якості електроенергії нетягових споживачів, які живляться від ліній «два проводи – рейка», № держреєстрації 0115U003922;
- «Дослідження транзиту потужності тяговою мережею при відхиленнях режиму напруги тягової підстанції змінного струму», № держреєстрації 0115U003919;
- «Дослідження режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій постійного струму та в тяговій мережі в умовах гірського перевалу», № держреєстрації 0115U003921;
- «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту», № держреєстрації 0115U002311;
- «Дослідження раціональних режимів роботи системи тягового електропостачання для зменшення втрат електроенергії», № держреєстрації 0115U003918;
- «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем», № держреєстрації 0116U006982.

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

Мета і завдання дослідження

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

Для досягнення поставленої мети необхідне вирішення наступних завдань:

1. Виконати аналіз стану проблеми енергоефективності режимів електропостачання залізничного транспорту, дослідити механізми ефективного використання електроенергії.
2. Розвинути метод розрахунку миттєвих схем систем тягового електропостачання для коректного визначення режиму напруги при наявності на електрорухомому складі систем стабілізації тягової потужності.
3. Розробити метод розрахунку систем тягового електропостачання на основі просторово-часового уявлення електричних величин, з урахуванням керованих елементів в системах електричної тяги.
4. На основі експериментальних даних системно проаналізувати режими роботи систем тягового електропостачання постійного та змінного струму та дослідити вплив спотворень якості електроенергії на енергетичні характеристики і точність систем обліку.
5. Розробити наукові основи інтелектуального управління режимом напруги в системі електропостачання тяги постійного струму за рахунок визначення керуючої послідовності впливів на пристрої тягового електропостачання.
6. Удосконалити методи узгодженої взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання.

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

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

Предмет дослідження – енергоефективність режимів роботи системи тягового електропостачання.

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

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні наукові положення, висновки і рекомендації, які отримані в дисертації, обґрунтовані та достовірні оскільки експериментальні дослідження коректно поставлені та кваліфіковано виконані, розбіжність теоретичних розрахунків і дослідних даних не перевищує 5 %; дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики; більшу частину експериментальних даних одержано різними незалежними методами.

Основні наукові положення

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

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

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

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше:

1) запропоновано функцію опору тягової мережі та отримано аналітичні вирази у вигляді квадратичних залежностей з урахуванням питомого опору тягової мережі та координат вузлів з'єднання контактних підвісок відносно довжини ділянки, які дозволяють застосувати формальний підхід та перейти від дискретного до неперервного розрахунку систем тягового електро-

постачання незалежно від схеми живлення та місцевих особливостей електрифікованих ділянок залізниць;

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

3) запропоновано концепцію комплексного дослідження для тягових підстанцій електрифікованих залізниць, яка передбачає одночасне врахування часових залежностей основних показників якості електроенергії та додатково коефіцієнтів спотворення і фазових портретів струмів навантаження для окремих класів первинної напруги підстанцій, що дозволило порівняти енергоефективність систем тягового електропостачання постійного і змінного струму з урахуванням спотворень якості електроенергії та вмісту неактивних складових повної потужності.

Дістали подальшого розвитку та удосконалені:

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

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

інформації на підставі лише дискретного розподілу спаду напруги в контактній мережі;

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

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

Практичне значення одержаних результатів

Отримані в дисертації результати теоретичних та експериментальних досліджень дозволили:

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

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

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

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

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

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

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

Результати роботи у вигляді фізичних моделей випрямляча тягової підстанції постійного струму, пристрою плавної компенсації реактивної потужності, пристрою вимірювання напруги та комп'ютерної програми, впрова-

джені в навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та використовуються при підготовці бакалаврів і магістрів зі спеціальності «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

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

Особистий внесок здобувача

Постановка мети та розробка задач дослідження виконані спільно з науковим консультантом. Отримані наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження, виконані в дисертаційній роботі, отримано дисертантом самостійно. У роботах, які написані в співавторстві, автору належать: [8] – концепція та схемна реалізація системи моніторингу напруги в тяговій мережі; [10] – статистичний аналіз показників якості електроенергії, розрахунки складових повної потужності для системи постійного та змінного струму; [11] – методологія виконання розрахунків, виведення формул та їх узагальнення до різних схем живлення; [12] – розділи монографії з комплексного аналізу якості електроенергії в системі електричної тяги змінного струму, обліку електроенергії у несинусоїдних режимах тягових підстанцій, розробки технічних засобів підвищення якості електричної енергії в системах змінного струму; [13] – розробка схем підключення засобів вимірювальної техніки для дослідження електромагнітних процесів; [14] – виведення теоретичних співвідношень функцій втрат потужності для різних схем живлення; [15] – розробка імітаційної моделі та виконання варіантних розрахунків для різних графіків руху поїздів; [16] – теоретичні дослідження та отримання квадратичних функцій струмозподілу; [17] – розробка алгоритму пошуку мінімуму цільової функції з використанням імітаційної моделі системи тягового електропостачання; [20] – розробка схеми проведення натурних досліджень, узагальнення результатів спектрального аналізу осцилограм випрямленої напруги; [21] – теоретичні викладки та узагальнення отриманих спів-

відношень розрахунку струму підсилюючого пункту тягової мережі; [22] – постановка експериментальних вимірювань похибок лічильників електроенергії, аналіз та узагальнення результатів; [29] – формалізація аналітичних виразів для розрахунку режиму напруги; [30] – розробка схем проведення вимірювань та вимірювального пристрою, обробка результатів вимірювання; [33] – реалізація алгоритмів розрахунку втрат потужності з можливістю коригування графіку руху поїздів; [35] – принцип генерації додаткової потужності підсилюючим пунктом на основі розподіленої системи синхронних вимірювань напруги в контактній мережі; [36] – розробка концепції побудови програмного продукту, реалізація алгоритмів багатопотокових обчислень і основних класів системи моделювання; [37] – аналіз особливостей функціонування оптового ринку електроенергії стосовно електропостачання електрифікованих залізниць; [39] – багатоваріантні обчислення режимів виконання графіку руху поїздів, аналіз зниження втрат потужності в тяговій мережі; [40] – узагальнення способів коригування графіку руху поїздів для зменшення експлуатаційних витрат; [41] – отримання розрахункових формул для різних варіантів підсилення тягової мережі постійного струму; [43] – формалізація цільової функції та вибір методу оптимізації; [44] – аналіз результатів вимірювання режиму напруги; [46] – розрахункові формули з визначення функції опору тягової мережі на двоколійних ділянках; [48] – визначення та ранжування факторів, що впливають на втрати електроенергії в контактній мережі; [50] – розробка схемних рішень фізичного макету; [51] – синтез перетворювача сигналів для розширення можливостей вимірювального приладу; [53] – формулювання критеріїв та обмежень для роботи системи стабілізації; [54] – аналіз результатів проведених вимірювань; [55] – аналіз причин та наслідків від виникнення вирівнювальних струмів в тяговій мережі; [56] – розрахунки варіантів зниження транзиту потужності тяговою мережею; [57] – розробка схемних рішень для одночасного вимірювання в колі постійного і змінного струму.

Роботи [7, 9, 18, 19, 23-28, 31, 32, 34, 38, 42, 45, 47, 49, 52] написані самостійно, без співавторів.

Апробація результатів дисертації

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

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

Публікації

Основні положення дисертації опубліковано у 25 основних працях, з них: 2 – статті у журналах, що індексуються Scopus [7, 8]; 3 – статті в закордонних виданнях [9-11]; 1 – монографія, 19 – статті у фахових виданнях, і 26 додаткових, з них 2 – патенти на корисну модель, 2 – свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерна програма), 6 – додаткові статті, 16 – тези доповідей та матеріали міжнародних науково-практичних конференцій.

Структура дисертації

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