

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

**САБЛІН ОЛЕГ ІГОРОВИЧ**



УДК 621.331:621.332

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ  
В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт,  
галузь знань 27 – транспорт

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

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інтелектуальних систем електропостачання Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Кузнецов Валерій Геннадійович**,  
професор кафедри інтелектуальних систем електропостачання Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна Міністерства освіти і науки України, м. Дніпро

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Блиндюк Василь Степанович**,  
проректор з науково-педагогічної роботи Українського державного університету залізничного транспорту Міністерства освіти і науки України, м. Харків;

доктор технічних наук, професор  
**Любарський Борис Григорович**,  
професор кафедри електричного транспорту та тепловозобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків;

доктор технічних наук, професор  
**Хворост Микола Васильович**,  
завідувач кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова Міністерства освіти і науки України, м. Харків.

Захист відбудеться «05» липня 2018 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01 при Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, ауд. 314.

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

Автореферат розіслано «04» червня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 08.820.01,  
доктор технічних наук, професор



А. М. Муха

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

*Актуальність теми.* Енергетична стратегія України на період до 2035 року передбачає зниження енергоємності всіх галузей вітчизняної промисловості. Транспортна система країни займає четверте місце серед споживачів енергоресурсів, де більше 85 % витрат енергії припадає на здійснення перевізного процесу. У собівартості перевезень транспорту з електричною тягою енерговитрати сьогодні оцінюються на рівні 21...23 % і в наслідок подорожчання енергоносіїв мають стійку тенденцію до зростання. Зниження або стримування цього показника вимагає постійного розвитку і вдосконалення енергозберігаючих технологій відповідно до нових можливостей сучасних технічних засобів та методів управління ними. При інтеграції України у європейський простір це є важливим елементом у реалізації програми ЄС «Пакет дій щодо боротьби зі зміною клімату та використання відновлюваної енергії», що ставить завдання перед європейськими країнами до 2020 р. знизити шкідливі викиди в атмосферу на 21 % порівняно з 1990 р.

Основними технологіями енергозбереження в системах електричної тяги на сьогодні є впровадження енергоефективних режимів руху транспорту, вдосконалення конструкції та оптимізація встановленої потужності електрорухомого складу і тягових підстанцій, зниження перетікань потужності і підвищення якості електроенергії в системах тягового електропостачання, впровадження пристроїв компенсації реактивної потужності, регулювання напруги в тяговій мережі та ін. При цьому одним з важливих резервів зниження енергоємності і покращення екологічних показників електричного транспорту є використання можливостей часткового відновлення витраченої на тягу енергії шляхом її рекуперації, що дозволяє зменшувати витрати енергії на перевезення в різних видах руху на 10...40 %. Однак внаслідок технологічних особливостей процесів тягового електроспоживання і рекуперації на електрифікованому транспорті сьогодні існує ряд обмежень щодо можливостей повернення і повторного використання відновленої енергії. Це, у свою чергу, є однією з причин незначних обсягів рекуперації енергії, середній показник якої зараз не перевищує 2...3 %.

Стратегія модернізації системи електричного транспорту в довгостроковій перспективі передбачає оновлення її інфраструктури та парку рухомого складу, а саме впровадження накопичувачів і багатофункціональних перетворювачів енергії на електрорухомому складі і тягових підстанціях, поступову інтеграцію відновлюваних джерел енергії до систем тягового електропостачання, інтелектуалізацію руху транспортних засобів, інформатизацію взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання та ін., що відповідає сучасним світовим тенденціям розвитку енергоефективної транспортної системи.

Значний внесок в розв'язання теоретичних і прикладних проблем енергозбереження на різних етапах розвитку електрифікованого транспорту зробили такі учені як Андрієнко П.Д., Аржанніков Б.О., Бабаєв М.М., Бардушко В.Д., Блиндюк В.С., Браташ В.О., Бурков А.Т., Гетьман Г.К., Далека В.Х., Доманський В.Т., Дубинець Л.В., Закарюкін В.П., Іньков Ю.М., Ісаєв І.П., Калінін В.К., Костін М.О., Котельников А.В., Кузнецов В.Г., Любарський Б.Г., Мамошин Р.Р., Марикін А.Н., Марквардт К.Г., Мірошніченко Р.І., Мокін Б.І., Омелянен-

ко В.І., Панасенко М.В., Плакс А.В., Пупинін В.Н., Розенфельд В.Е., Савоськин А.Н., Сінчук О.М., Сиченко В.Г., Тіхменев Б.Н., Тер-Оганов Э.В., Трахтман Л.М., Феоктистов В.П., Хворост М.В., Черемісін В.Т., Щербак Я.В., Capasso A., González-Gil A., Masatsuki I., Pawelczyk M., Rojek A., Szelag A. та ін. Основна увага даних учених приділялася питанням оптимізації параметрів і режимів роботи тягово-енергетичних систем рухомого складу та пристроїв їх електропостачання, але проблема ефективного використання енергії рекуперації до теперішнього часу залишається невирішеною.

Поява сучасних енергетичних пристроїв та smart grid технологій дозволяє вирішувати проблему використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту на якісно новому рівні, реалізуючи інтелектуальні алгоритми керування накопичувачами енергії, інверторами та регуляторами напруги. При цьому можливим стає оптимальний за енергетичним критерієм розподіл енергії між елементами систем тягового і зовнішнього електропостачання з урахуванням комплексного підходу до енергоефективності процесу рекуперації. Це дозволить транспортним засобам здійснювати рекуперацію енергії незалежно від графіків руху на ділянках, наявності тягового електроспоживання в момент рекуперації і режимів систем зовнішнього електропостачання, що забезпечить допустимий рівень напруги на струмоприймачах при рекуперації, значно знизить використання реостатного гальмування на транспортних засобах та втрати енергії рекуперації.

З огляду на вищесказане, розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту є безумовно актуальним напрямом наукових досліджень.

***Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.*** Робота виконана у відповідності з:

- Енергетичною стратегією України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність», затвердженою постановою Кабінету Міністрів України № 605-р від 18.08.2017.
- Державною цільовою програмою реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки, ухваленою Постановою Кабінету Міністрів України № 1390 від 16.12.2009 р. (із змінами, внесеними згідно з Постанови № 970 від 24.10.2012);
- Державною цільовою програмою розвитку міського електротранспорту на період до 2017 року, ухваленою Постановою Кабінету Міністрів України № 1855 від 29.12.2006 р. (із змінами, внесеними згідно з Постанови № 25 від 20.01.2016).

Обраний напрям дослідження безпосередньо пов'язаний з виконанням науково-дослідних робіт за наступними темами: «Підвищення ефективності електроспоживання ділянками системи електричної тяги постійного струму» (№ ДР 0109U000478); «Підвищення ефективності електропостачання об'єктів залізничного транспорту» (№ ДР 0111U009393); «Забезпечення раціональних режимів систем тягового електропостачання» (№ ДР 0111U009393); «Прикладне конструкторське моделювання програмних сутностей» (№ ДР 0116U006841); «Науко-

ві основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» (№ ДР 0115U002311); «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем» в рамках конкурсу наукових проєктів молодих вчених МОН України (№ ДР 0116U006982); «Вдосконалені інформаційні технології моделювання взаємодії рухомого складу та колії» в рамках конкурсу міжнародних україно-білоруських наукових проєктів МОН України (№ ДР 0117U006396). Результати дисертаційної роботи отримано при виконанні вказаних досліджень, у яких дисертант виступав виконавцем, відповідальним виконавцем і співавтором звітів з науково-дослідних робіт.

**Мета роботи.** Метою роботи є розвиток наукових підходів щодо енергоефективного управління режимами тягового електропостачання систем електрифікованого транспорту при рекуперації електроенергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Аналіз показників ефективності використання енергії рекуперації в різних видах руху електрифікованого транспорту (магістральний і приміський залізничний, міський, метрополітен).
2. Дослідження впливу режимів систем зовнішнього електропостачання на ефективність передачі енергії рекуперації в первинну живлячу мережу.
3. Розробка імітаційної моделі квазіусталеного процесу розподілу енергії рекуперації в тяговій мережі з урахуванням можливостей її накопичення та передачі до системи зовнішнього електропостачання та дослідження впливу експлуатаційних факторів на ефективність розподілу.
4. Удосконалення методу розрахунку системи тягового електропостачання в режимі рекуперації для визначення раціонального розподілу надлишкового струму рекуперації за енергетичним критерієм та визначення показників ефективності використання енергії рекуперації для класичних і перспективних систем тягового електропостачання.
5. Розробка наукових принципів моделювання зони розподілу енергії рекуперації для багатоваріантних структур системи тягового електропостачання на основі математико-алгоритмічного конструктивізму.
6. Розробка методу управління режимами енергообміну накопичувачів, інверторів та регуляторів напруги тягових підстанцій на основі нейро-нечіткої логіки в залежності від структури системи тягового електропостачання.
7. Удосконалення методу визначення потенціалу енергозбереження за рахунок підвищення ефективності використання енергії рекуперації в існуючих і перспективних системах електрифікованого транспорту.
8. Розробка практичних рекомендацій з підвищення ефективності використання енергії рекуперації та їх техніко-економічна оцінка.

**Об'єкт досліджень** – процес рекуперації електроенергії та ефективність її споживання в системах тягового та зовнішнього електропостачання електрифікованого транспорту.

**Предмет досліджень** – енергоощадні алгоритми управління технічними засобами розподілу та споживання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту.

**Методи досліджень** – статистичний, спектральний та кореляційний аналіз при дослідженні імовірнісних характеристик та гармонічного складу графіків рекуперації енергії транспортних засобів, режимів напруги на їх струмоприймачах та шинах тягових підстанцій; регресійний аналіз – при визначенні залежності теорія електричної тяги та електричних кіл при моделюванні режимів тягового електроспоживання та квазіусталеного струморозподілу енергії рекуперації в системах тягового і зовнішнього електропостачання; принципи математико-алгоритмічного конструктивізму при генеруванні багатоваріантних структур і режимів систем тягового електропостачання з наступною розробкою для них алгоритмів раціонального управління на основі теорії експертних систем та нейро-нечіткої логіки; теорія потенціалів енергозбереження для техніко-економічної оцінки розроблених технологій щодо підвищення енергоефективності використання енергії рекуперації. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана з використанням програмних засобів Excel, MathCad, Statistica. Імітаційне моделювання виконувалось у середовищі MatLab.

***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 загальноприйнятих значень; дослідні результати одержано на основі великого обсягу реального фактичного матеріалу з подальшою обробкою методами математичної статистики; більшу частину експериментальних даних одержано різними незалежними методами.

***Наукова новизна одержаних результатів***

***Вперше:***

1. На основі експериментальних досліджень науково обґрунтовано раціональні умови передачі енергії рекуперації до систем зовнішнього електропостачання, при яких забезпечується нормативний діапазон напруги на ввіді тягових підстанцій при роботі інверторів та стійкий процес рекуперації транспортних засобів.
2. Запропоновано в якості параметра ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі використовувати швидкість зміни напруги на шинах постійного струму тягових підстанцій та науково обґрунтовано її діапазон, що забезпечує координацію роботи пристроїв розподілу енергії рекуперації та захисту максимальної напруги на ЕРС, при якій зменшується імовірність «зривів» рекуперацій.
3. Розроблені принципи моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічного конструктивізму, що дозволило поставити і запропонувати підходи до розв'язання декілька класів задач: раціонального розташування енергозберігаючого обладнання, вибору його параметрів та оптимальних алгоритмів управління в залежності від структури та режимів систем тягового електропостачання.

4. Отримано залежність коефіцієнта споживання енергії рекуперації від експлуатаційних та режимних параметрів системи електричної тяги, що дозволяє розробляти на базі цього науково обґрунтовані рішення щодо раціонального розподілу енергії за критерієм мінімуму втрат в елементах систем тягового та зовнішнього електропостачання.
5. Запропоновано метод інтелектуального управління процесом розподілу енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту за енергетичним критерієм на основі експертних систем та нейро-нечіткої логіки, що дозволяє в залежності від багатоваріантності структури системи тягового електропостачання максимально використовувати потенціал енергозбереження від рекуперації в умовах неповної інформації про режими систем тягового і зовнішнього електропостачання.

*Отримали подальший розвиток:*

6. Метод розрахунку системи тягового електропостачання в частині декомпозиції струму рекуперації транспортних засобів на складові, що відрізняється від існуючих вирахуванням багатоваріантності структури системи тягового електропостачання і дозволяє визначати показники ефективності використання енергії рекуперації як в існуючих так і в перспективних системах тягового електропостачання.
7. Метод визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту при рекуперації енергії в частині врахування експлуатаційних факторів, структури та режимів систем тягового та зовнішнього електропостачання, що дає можливість оптимізувати параметри енергозберігаючого обладнання на стадії проектування енергозберігаючих заходів та зменшити капітальні витрати при їх впровадженні.

***Практичне значення одержаних результатів***

1. Використання експериментально обґрунтованого діапазону напруг на вводах тягових підстанцій  $U_{\max} \dots U_{\min}$  дозволяє приймати оперативні рішення щодо доцільності передачі енергії рекуперації до системи зовнішнього електропостачання в залежності від її завантаження у вузлах приєднання тягових підстанцій, що забезпечує нормативні показники електропостачання нетягових споживачів.
2. Оцінка потенціалу енергозбереження систем електрифікованого транспорту при рекуперації енергії на базі вдосконаленого методу дозволяє виявляти резерви економії енергії в системах електричної тяги в залежності від її експлуатаційних показників та виконувати техніко-економічне обґрунтування заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації.
3. Запропоновані методи управління режимами енергообміну накопичувачів, напруги на виході інверторів та на шинах постійного струму тягових підстанцій дозволяють забезпечити нормативні показники електроенергії при її передачі до зовнішньої мережі, підвищити коефіцієнт завантаження накопичувачів, інверторів і регуляторів напруги до 0,8...0,9 та мінімізувати їх встановлену потужність, що дозволить зменшити капітальні витрати при модернізації існуючих та електрифікації нових ділянок залізниць, міського транспорту та метрополітенів.

4. Розроблені способи ситуаційного регулювання напруги холостого ходу на шинах постійного струму тягових підстанцій дозволяють розширити зону рекуперації електротранспорту, що збільшує відстань передачі енергії в тяговій мережі в границях допустимої напруги на струмоприймачах транспортних засобів та обсяги рекуперації енергії на 17...20 %.
5. Розроблений програмний комплекс по навчанню експертної системи для управління розподілом енергії рекуперації в тяговій мережі дає змогу моделювати процеси взаємодії систем тягового і зовнішнього електропостачання та транспортних засобів в режимі рекуперації як для існуючих систем так і перспективних, на стадії їх проектування. В цілому розроблені в дисертації методи та принципи можуть бути використані в якості інструментарію для побудови smart grid систем тягового електропостачання транспорту.
6. Використання в комплексі розроблених технологій на електрифікованих залізницях постійного струму за наявної комплектації парку електрорухомого складу системою рекуперативного гальмування дозволить на 45...49 % збільшити обсяги рекуперації енергії від поточного стану та значно знизити імовірність «зривів» процесу рекуперації енергії в тягових мережах.
7. Результати дисертаційної роботи впроваджені в КП «Дніпровський електротранспорт», службі електропостачання ДГТО «Львівська залізниця», ТОВ «ДАК-Енергетика» та у навчальний процес Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові положення, розробки й результати досліджень, що виносяться на захист, отримані особисто автором. У наукових працях, що опубліковані в співавторстві, особистий внесок автора такий: [1] – аналіз роботи тягових мереж в режимі рекуперації енергії; [2, 33, 34] – дослідження факторів що впливають на точність обліку енергії рекуперації, оцінка статистичних показників обсягів рекуперації енергії в приміському русі; [3, 36-39] – формалізація задачі оптимального розподілу надлишкової енергії рекуперації, обґрунтування цільових функцій та обмежень, формулювання нечітких правил моделі; [4] – оптимізація режимів тягового електроспоживання і рекуперації енергії в системах тягового електропостачання; [5] – спектральний аналіз напруги на струмоприймачі і тягового струму трамваїв, визначення складових повної потужності; [6] – статистичний аналіз похибок лічильників електровозів; [7] – спектральний аналіз напруги і струму на вводах тягової підстанції постійного струму, статистичний аналіз показників якості енергії на вводі тягової підстанцій постійного струму в режимі холостого ходу і навантаження; [10] – дослідження впливу нерівномірності режимів тягового електроспоживання на рівень втрат енергії в тяговій мережі, аналіз можливості зменшення втрат на основі зниження надлишкової потужності транспортних засобів шляхом тимчасового вимикання тягових двигунів; [11] – визначення миттєвих енергетичних показників трамваїв та їх статистичний аналіз; [12] – аналіз сучасного стану проблем використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту; [13] – обґрунтування ефективної зони рекуперації в залежності від напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій та співвідношення потужності елект-



роспоживання та рекуперації на ділянці та допустимих меж зниження напруги на шинах підстанції для розширення зони рекуперації; [16, 31, 32] – експериментальні вимірювання витрати та генерації електроенергії поїздів метрополітену в режимах тяги і електричного гальмування в залежності від графіків руху, оцінка потенціалу енергозбереження в метрополітені при впровадженні систем рекуперативного гальмування на поїздах; [17, 35] – аналіз режимів напруги на струмоприймачі електровозу при рекуперації на ділянках з інверторними підстанціями та розподілу надлишкового струму рекуперації по підстанціям; [19, 41] – постановка задачі, конкретизація конструктивно-продукційної структури та наповнення її атрибутикою; [20] – визначення технічно-реалізованого потенціалу енергозбереження в системі електротранспорту при рекуперації електроенергії в залежності від виду застосованої енергозберігаючої технології та вибір економічно-доцільних варіантів; [22] – розрахунок додаткових втрат енергії в елементах системи електричної тяги від неактивної складової повної потужності електрорухомого складу в режимі тяги; [23] – визначення складових повної потужності електрорухомого складу в режимі рекуперативного гальмування; [24] – дослідження частотних характеристик малогабаритних енергоощадних реакторів тягових підстанцій; [25] – постановка та формулювання мети дослідження; [27] – обґрунтування цільових функцій ефективності тягового електроспоживання за критерієм мінімуму втрат енергії в тягових мережах; [28] – огляд існуючого стану використання інформаційних технологій в системах тягового електропостачання на предмет можливості їх використання при рекуперації енергії; [30] – обґрунтування цільової функції та обмежень оптимального розподілу енергії рекуперації; [40] – обґрунтування цільових функцій та обмежень регулювання напруги; [43] – порівняння заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації за різними показниками; [44] – аналіз технічних рішень щодо підвищення ефективності використання енергії рекуперації за енергетичними і вартісними показниками; [44] – дослідження можливостей підвищення коефіцієнта завантаження накопичувачів енергії в системах тягового електропостачання на основі примусового управління режимами їх енергообміну.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і одержали схвалення на III-VI Міжнародних науково-практичних конференціях «Енергозбереження на залізничному транспорті і в промисловості» (Воловець, 2012-2015); II-IV Міжнародних науково-технічних конференціях «Оптимальне керування електроустановками» ОЖЕУ» (Вінниця, 2013, 2015, 2017); I Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми розвитку інтелектуальних систем транспорту» (Дніпропетровськ, 2014); VII та VIII Міжнародних науково-практичних конференціях «Електрифікація залізничного транспорту. ТРАНСЕЛЕКТРО» (Одеса, 2014, 2015); III, V, VI International Conference «Najnowsze technologie w transporcie szynowym» (Warsaw, 2014, 2016, 2017); 75 та 76 Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпропетровськ, 2015, 2016); IX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на

транспорті, в промисловості та освіті» (Дніпропетровськ, 2015); 4th International Conference «Advanced Rail Technologies» (Warsaw, 2015); I та II Міжнародних науково-практичних конференціях «Енергооптимальні технології перевізного процесу» (Моршин, 2016; Львів, 2017); VIII Международной научно-практической конференции «Проблемы безопасности на транспорте» (Гомель, 2017). В повному обсязі дисертація доповідалась на міжкафедральному науковому семінарі у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковано у 21 основній праці, з них: 3 – статті в закордонних виданнях, що індексуються БД Scopus; 1 – монографія, 17 – статті у фахових виданнях України, і 26 додаткових, з них 2 – охоронні документи, 19 – тези доповідей та матеріали міжнародних наукових конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та 4-х додатків. Повний обсяг дисертації становить 367 сторінки, серед них 120 рисунків за текстом, з них 13 рисунків розташовано на 7 окремих сторінках, 39 таблиць за текстом, список використаних джерел з 301 найменування – на 36 сторінках, додатки – на 47 сторінках. Основний текст роботи викладено на 277 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

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

У *першому розділі* проаналізовано стан проблеми, фактори, що впливають на ефективність процесу використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту, а також існуючі методи та засоби підвищення ефективності цього процесу, на основі чого сформульовано мету та задачі дослідження.

На сучасному ЕРС з плавним регулюванням потужності використання режиму рекуперативного гальмування дозволяє практично виключити з енергетичного балансу складову втрат енергії в гальмах, оскільки здійснення рекуперації на такому ЕРС можливо майже до його зупинки. Транспортні засоби циклічного руху, що працюють на високих швидкостях з короткими відстанями між зупинками, мають великий резерв кінетичної енергії, використання якої дає значну економію енерговитрат на тягу. Однак для цього в тяговій мережі повинен бути забезпечений гарантований споживач енергії рекуперації.

В дисертації досліджено основні фактори що впливають на ефективність процесу споживання енергії рекуперації в системах електричного транспорту. Серед них є графіки, розміри руху на ділянках та середня швидкість, що формують режими тягового електроспоживання ЕРС, напруга холостого ходу на шинах тягових підстанцій (ТП), схеми живлення контактної мережі, режим системи зовнішнього електропостачання на ввіді ТП, наявність накопичувачів енергії, інверторів та регуляторів напруги на ТП. В кінцевому рахунку ці фак-

тори визначають режим напруги на струмоприймачах транспортних засобів при рекуперації, що є випадковим процесом.

На сьогодні розв'язання проблеми використання надлишкової енергії рекуперації в системах електричного транспорту виконується за декількома напрямками (рис. 1). Виконаний в роботі аналіз існуючих методів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту дозволив визначити перспективні напрями їх вдосконалення.

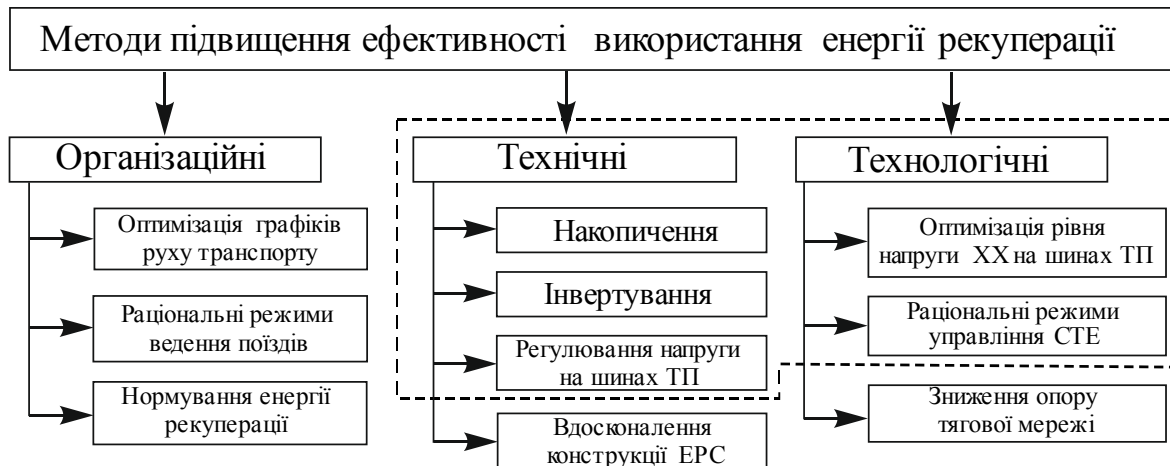


Рисунок 1 – Класифікація методів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту

Основним організаційним заходом в цьому напрямі, що не потребує капітальних витрат, є оптимізація графіків руху транспорту по критерію споживання енергії рекуперації. Але ефективність заходу є обмеженою і виявляється лише на двоколійних ділянках із затяжними спусками, коли можливе забезпечення зустрічного руху поїздів на ділянках рекуперації. При відсутності інтелектуальних принципів управління електроспоживанням поїздів регулювання лише їх положень не може гарантовано забезпечити в зоні рекуперації одночасного збігу процесів рекуперації та електроспоживання.

Основний енергозберігаючий ефект в цьому напрямі дозволяють отримувати технічні методи, однак потребують облаштування тягових підстанцій додатковим електрообладнанням і на сьогодні не виявляють бажаної ефективності. Так повернення надлишкової енергії рекуперації з тягової мережі в первинну енергосистему потребує забезпечення заданої якості енергії на виході інверторів. Крім того, як показують дослідження, первинна енергосистема не завжди може гарантовано споживати енергію рекуперації, оскільки цей процес залежить від режимів нетягових споживачів в точці підключення тягової підстанції. Оскільки енергосистема країни на сьогодні є недовантаженою і напруга на вводах більшості ТП (10, 35, 110 кВ) переважно тримається на верхній межі (або перевищує її), ефективність і власне можливість споживання надлишкової енергії рекуперації системою зовнішнього електропостачання є обмеженою.

Використання накопичувачів енергії в системах тягового електропостачання (СТЕ) направлено на вирішення двох протилежних задач, а саме демпфі-

рування різкозмінних тягових навантажень та поглинання надлишкової енергії рекуперації. В такому разі ефективність роботи накопичувачів суттєво залежить від способу регулювання їх енергообмінних режимів, що на сьогодні в повній мірі не реалізовано в системах управління накопичувачами.

Технологічні методи дозволяють підвищувати ефективність споживання енергії рекуперації переважно за рахунок оптимізації напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій та зменшення опору тягової мережі, що дозволяє збільшити зону рекуперації, тобто можливість її передачі до віддалених тягових навантажень в межах допустимої напруги на струмоприймачі, але при цьому збільшуються втрати енергії в тяговій мережі.

Нова схемотехніка, перспективи появи сучасного енергозберігаючого електрообладнання в системах тягового електропостачання та smart grid систем керування ним потребує вдосконалення підходів до розв'язання проблеми використання енергії рекуперації та розробки нових методів, на основі яких буде реалізовано ефективне функціонування силових енергетичних пристроїв. В дисертаційному дослідженні розглядається переважно розвиток і поєднання технічних і технологічних методів підвищення ефективності використання енергії рекуперації, як найбільш дієвих, що володіють високим енергозберігаючим ефектом (рис. 1, виділено пунктиром). При цьому поєднання декількох методів на основі інтелектуальних алгоритмів управління пристроями може дозволити значно зменшити встановлену потужність потрібного електрообладнання та мінімізувати втрати енергії рекуперації.

У *другому розділі* представлено результати експериментальних досліджень ефективності режимів рекуперації енергії в системах електричного транспорту, проаналізовані кількісні та якісні показники енергії рекуперації та фактори що впливають на них. Дослідження проводилися на ділянках Придніпровської та Львівської залізниць, Дніпровських метрополітені та міському електротранспорті.

Рекуперація енергії в загальному випадку представляє собою випадковий процес, що залежить від режиму гальмування та напруги на струмоприймачі транспортного засобу, що являє собою при цьому рухоме джерело енергії, споживаної тяговою мережею. Кількість енергії, що виробляється при рекуперативному гальмуванні залежить від ряду параметрів та визначається виразом

$$W_p = \left( 0,01073Q(1+\gamma)(v_{\Pi}^2 - v_K^2) - 2,725Q(w_0 \pm i_{\text{ЕКВ}})S \right) \eta_p, \quad (1)$$

де  $Q$  – маса поїзда;  $(1+\gamma)$  – коефіцієнт інерції обертових мас поїзда;  $v_{\Pi}$ ,  $v_K$  – швидкість відповідно початку і кінця гальмування;  $w_0$  – основний питомий опір руху поїзда при середній швидкості на ділянці гальмування;  $i_{\text{ЕКВ}}$  – еквівалентний ухил на ділянці гальмування;  $S$  – довжина гальмівного шляху;  $\eta_p$  – ККД ЕРС в режимі рекуперації.

Особливістю процесу рекуперації є його залежність від режиму напруги в тяговій мережі, тому в умовах експлуатації найчастіше реалізується енергія  $W_p' < W_p$ . При цьому частина енергії, що не може бути прийнята тяговою мережею є надлишковою енергією рекуперації

$$W_{\text{надл. P}} = W_P - W_P', \quad (2)$$

яка в різних видах руху сягає 30...100 % від значення (1), що особливо проявляється при малих розмірах руху на ділянках.

Режим рекуперації в системі електричної тяги потребує наявності гарантованого споживача виробленої енергії, при відсутності якого підвищується напруги на струмоприймачі рекуперативного ЕРС і в тяговій мережі (рис. 2). При досягненні верхньої границі напруги на струмоприймачі (рис. 3, а) відбувається «зрив» рекуперації і перехід ЕРС на реостатне або механічне гальмування, при яких енергія рекуперації утилізується в гальмах.

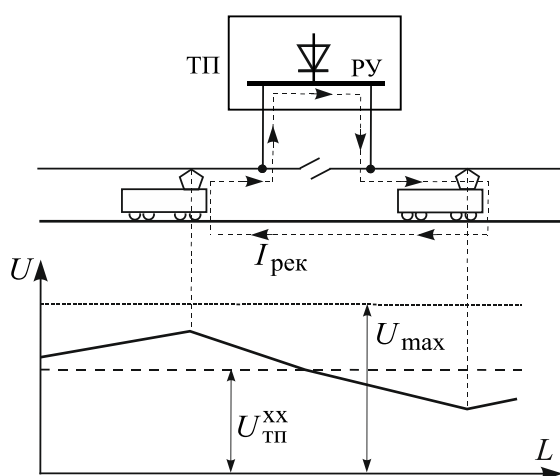
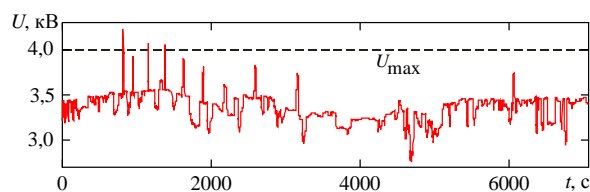
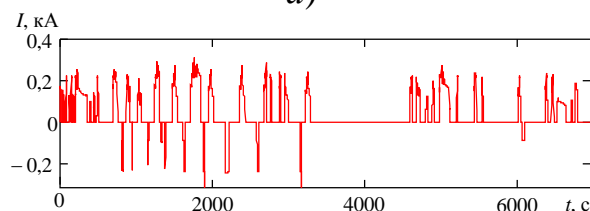


Рисунок 2 – Режим напруги в тяговій мережі при наявності на ділянці рекуперації



а)



б)

Рисунок 3 – Часові діаграми напруги на струмоприймачі (а) і тягового струму (б) вагону електропоїзду ЕПЛ2Т

Дослідження режиму напруги на струмоприймачах і в тяговій мережі при рекуперації дозволило врахувати його вплив на ефективність процесу в різних умовах, а також визначити вплив рівня напруги на шинах тягових підстанцій на втрати енергії рекуперації. Основні імовірнісні характеристики режиму напруги на струмоприймачах ЕРС постійного струму при рекуперації в різних видах руху наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Імовірнісні характеристики напруги на струмоприймачі в режимі рекуперації

Вид транспортного засобу	Параметри					
	$m_U$ , В	$\sigma_U$ , В	$Mo_U$ , В	$Me_U$ , В	$As_U$ , відн.од.	$Ex_U$ , відн.од.
Вантажні електровози	3682	286	3589	3756	0,34	1,31
Електропоїзди ЕПЛ2Т	3769	364	3697	3582	-0,25	0,96
Трамваї ТЗД	782	68	752	746	0,16	-1,87

*Дослідження впливу режимів живлячої мережі.* При наявності інверторів на ТП постійного струму режим напруги в тяговій мережі поліпшується за рахунок передачі енергії рекуперації в мережу середньої (високої) напруги змін-

ного струму за умови, що її прийом узгоджений як в технічному так і комерційному аспектах, а саме за максимально допустимою короткочасною потужністю, що приймається живлячою мережею, прийнятним рівнем гармонік та готовністю енергопостачальної компанії до рефінансування.

Використання інверторів на ТП постійного струму поширено лише на деяких гірських ділянках Львівської залізниці з затяжними ухилами (до 30 %). На даних ділянках надлишкова енергія рекуперації передається з тягової мережі постійного струму 3,3 кВ до живлячої мережі змінного струму 10 (35, 110) кВ. Вмикання інверторів відбувається при зростанні напруги на шинах ТП до 3550...3600 В.

Для аналізу ефективності роботи інверторів на ділянці Львівської залізниці з ухилом 28,4 ‰ були проведені синхронізовані вимірювання параметрів енергії рекуперації на стороні постійного і змінного струмів двох суміжних ТП і поїзді в режимі рекуперації, що рухався між ними (рис. 4). Встановлено, що при цьому мав місце нерівномірний розподіл потужності рекуперації по відповідним ТП. Зокрема спостерігалася передача 75...80 % енергії рекуперації через віддалену ТП «В», що знаходилася на відстані до електровоза близько 90 % довжини міжпідстанційної зони. Вплив на режим роботи інверторів при цьому здійснювали живлячі мережі. Зафіксовано, що на даних ділянках при рекуперації на струмоприймачі електровоза напруга сягала значення 3,95 кВ, при якому відбувалося вимкнення однієї секції електровозу з режиму рекуперації.

Крім того було зафіксовані випадки, коли сумарна потужність

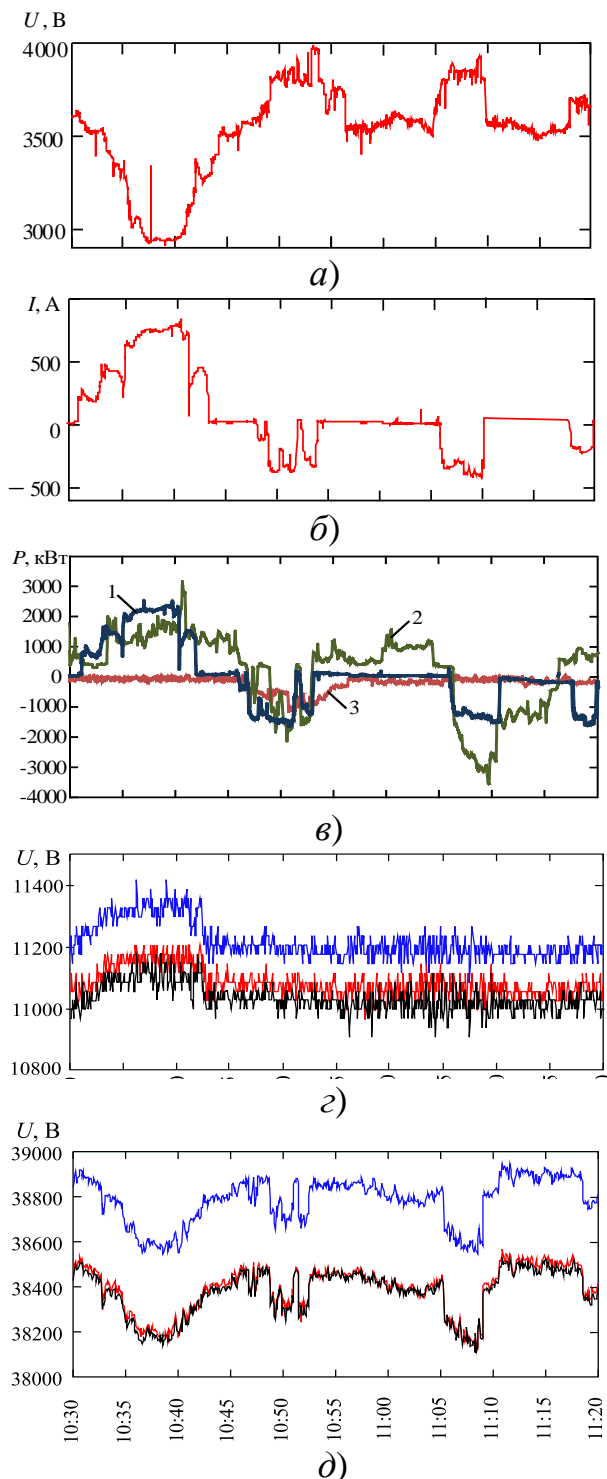


Рисунок 4 – Вплив режиму живлячої мережі на процес рекуперації: *а, б* – напруга на струмоприймачі і струм ЕРС; *в* – потужності ЕРС і ТП (1 – ЕРС; 2 – ТП «В»; 3 – ТП «С»); *г, д* – лінійні напруги на вводах ТП «С» (10 кВ) і «В» (35 кВ)

рекуперації на вводах суміжних ТП перевищувала потужність рекуперації поїзда (рис. 4, в), що пояснюється перетоками енергії по тяговій мережі від сусідніх ТП (працюючих у випрямному режимі), що знаходилися за межами дослідної ділянки.

*Дослідження стрибків напруги в тяговій мережі і на струмоприймачах ЕРС при рекуперації.* Важливим показником ефективності роботи інверторів на ТП є селективність їх вмикання при наявності надлишкової рекуперації на ділянках. Система управління вмиканням інвертора повинна ідентифікувати підвищення напруги на шинах ТП швидше ніж спрацює реле максимальної напруги на ЕРС і ввімкне реостатне гальмування. В якості параметру ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі запропоновано використовувати похідну напруги на шинах ТП, яка може бути визначена за стрибком напруги на струмоприймачі ЕРС на фідерній зоні. В роботі встановлені граничні діапазони похідної напруги на струмоприймачах ЕРС з контактною системою регулювання в комутаційних режимах (скидання тяги) та при ввімкненні рекуперації, що наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Статистичні характеристики стрибків напруги на струмоприймачах ЕРС

Система електричної тяги	$U_{\text{ном}}$ , В	Комутаційний режим		Режим рекуперації	
		$m_{dU/dt}$ , В/с	$\sigma_{dU/dt}$ , В/с	$m_{dU/dt}$ , В/с	$\sigma_{dU/dt}$ , В/с
Магістральні залізниці	3000	1520	320	395,4	126,3
Міський електротранспорт	750	1453	246	412,5	91,4

З табл. 2 видно, що похідна напруги на струмоприймачі при комутаційних процесах в 3...4 рази перевищує її значення в режимі рекуперації на ненавантаженому тягову мережу. З аналогічною швидкістю але у меншому діапазоні змінюється напруга на шинах тягової підстанції. Ця особливість дозволяє вибудувати систему ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі і використовувати цю ознаку для забезпечення своєчасного спрацювання інверторів (накопичувачів) або регуляторів напруги на шинах постійного струму ТП раніше моменту спрацювання захисту на транспортному засобі за максимальною напругою і перемикання його на реостатне гальмування.

*Дослідження кількісних і якісних показників ефективності рекуперації енергії.* В якості кількісного показника процесу рекуперації використано коефіцієнт відновлення (рекуперації), що є відношенням витрати енергії на тягу (з урахуванням витрат на власні потреби поїзду) до генерованої енергії при електричному гальмуванні

$$k_p = \frac{W_p}{W_T} = \sum_{i=1}^n \int_{t_{\text{Ti}}}^{t_{\text{Ki}}} U(t) I_p(t) dt \Big/ \int_0^T U(t) I_T(t) dt, \quad (3)$$

де  $U(t)$  – напруга на струмоприймачі ЕРС;  $I_p(t)$ ,  $I_T(t)$  – відповідно струми в режимі рекуперації і тяги;  $t_{Pi}$ ,  $t_{Ki}$  – відповідно моменти початку та закінчення рекуперативного гальмування;  $n$  – кількість актів рекуперативного гальмування.

Для ділянок Придніпровської залізниці з інтенсивним рухом коефіцієнт рекуперації приміських поїздів в середньому становить 0,21 та розподілений за нормальним законом (рис. 5).

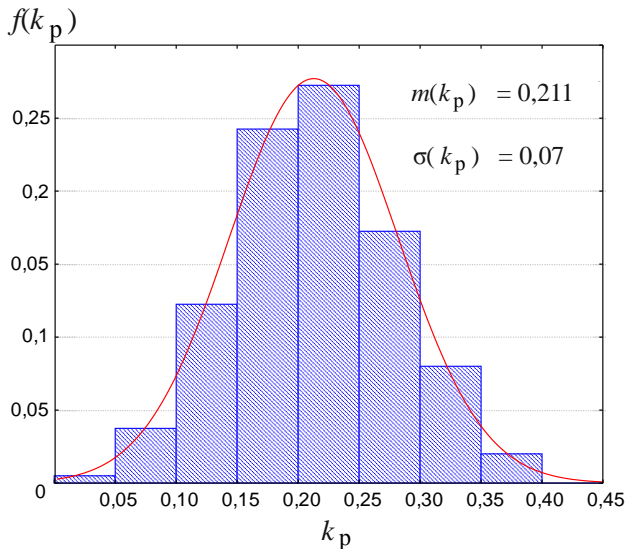


Рисунок 5 – Статистичний розподіл коефіцієнта рекуперації в приміському русі

На основі множини реалізацій потужності ЕРС  $\{P_n(t)\}$  було виконано розвиток напряму використання інтегральних показників (табл. 3) графіків рекуперації енергії, що кількісно характеризують якісний рівень енергії рекуперації з точки зору ефективності її споживання, в тому числі, стабілізованими енергосистемами (живлячою мережею) та оцінені їх чисельні значення для деяких систем електротранспорту (табл. 4).

Таблиця 3 – Інтегральні показники графіків рекуперації енергії

№ п/п	Назва	Аналітичний вираз
1	Коефіцієнт мінімуму енергії рекуперації	$\beta = P_{\min} / P_{\max}$
2	Пік-фактор (середньо-інтегральний коефіцієнт максимуму енергії рекуперації)	$\Pi = \frac{P_{\max}}{P_{cp}} = P_{\max} / \left( \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \right)$
3	Коефіцієнт заповнення або густина енергії рекуперації	$\gamma = \frac{P_{cp}}{P_{\max}} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \right) / P_{\max}$
4	Тривалість максимально-стабільної рекуперації енергії	$t_{cp \max} = \int_0^T P(t) dt / P_{\max} = \gamma T$
5	Діапазон коливання потужності рекуперації	$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$
6	Коефіцієнт форми потужності рекуперації	$k_{\Phi} = \frac{P}{P_{cp}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt} / \left( \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \right)$
7	Коефіцієнт коливання потужності рекуперації	$k_{\kappa} = \int_0^T  P(t) - P_{cp}  dt / \int_0^T P(t) dt$



В приведених виразах  $P_{\min}$ ,  $P_{\max}$ ,  $P_{\text{cp}}$ ,  $P(t)$  – відповідно мінімальна, максимальна, середня та миттєва потужності рекуперації ЕРС;  $T$  – тривалість процесу рекуперації енергії.

Таблиця 4 – Діапазон чисельних значень якісних показників графіків рекуперації енергії

№ п/п	Тип ЕРС	$\beta$	$\Pi$	$\gamma$	$t_{\text{cp max}}$ , с	$\Delta P$ , МВт	$k_{\Phi}$	$k_{\kappa}$
1	Електровози	2,1-4,2	1,4-7,52	0,11-0,8	35-257	0,9-2,4	1,2-3,7	0,2-0,4
2	Метрополітен	4,1-5,6	3,2-8,6	0,3-1,16	4,7-8,4	0,5-1,5	2,1-2,8	0,5-0,7
3	Трамваї	5,6-7,2	1,2-7,1	0,7-2,4	2,1-5,3	0,1-0,3	1,9-5,1	0,3-0,8

З аналізу даних табл. 4 видно, що генерована ЕРС при рекуперації енергія характеризується значною нерівномірністю в часі, а її показники змінюються в широкому діапазоні і носять імовірнісний характер. Величина коефіцієнта коливання  $k_{\kappa}$  вказує на те, що енергія рекуперації володіє змінною складовою на рівні 50...70 % (для метрополітенів) від повної енергії рекуперації, а значення коефіцієнта форми  $k_{\Phi}$  свідчить про збільшений в 2,1...2,8 разів рівень втрат рекуперативної енергії в опорі тяговій мережі (для трамваїв) над мінімально можливими втратами при стабілізованій генерації. Величина  $t_{\text{cp max}}$  дозволяє судити про тривалість кидків напруги, що будуть внесені в живлячу мережу при передачі до неї енергії рекуперації.

Відмінність розглянутих показників від оптимальних значень потребує їх врахування при розробці технологій щодо підвищення ефективності використання енергії рекуперації, та є важливим фактором при обґрунтуванні технічних рішень щодо її повернення до систем зовнішнього електропостачання шляхом інвертування на тягових підстанціях та при розробці алгоритмів сумісної роботи інверторів і накопичувачів, що забезпечать стабілізацію вихідної потужності інверторів при роботі на живлячу мережу.

У *третьому розділі* проведено моделювання квазіусталених процесів струморозподілу енергії рекуперації в системах тягового і зовнішнього електропостачання, визначені основні критерії ефективності розподілу та втрати енергії рекуперації.

Енергія рекуперації в тяговій мережі розподіляється в залежності від потужності та координати її споживачів (ЕРС в режимі тяги). При цьому відбувається її часткове розсіювання в елементах тягової мережі, де втрати цієї енергії можуть бути виражені як

$$\Delta W_P = r_0 \sum_{k=1}^n \int_{t_{\Pi}}^{t_{\kappa}} I_{P_k}^2 x_{P_k} dt = r_0 \sum_{k=1}^n \int_{t_{\Pi}}^{t_{\kappa}} \left( \frac{P_{T_k}}{U_k} - I_{\text{ТП}k} \right)^2 x_{P_k} dt, \quad (4)$$

де  $r_0$  – питомий опір тягової мережі;  $I_{P_k}$  – частина струму рекуперації споживана  $k$ -тим тяговим навантаженням;  $x_{P_k}$  – відстань від рекуперуючого ЕРС до  $k$ -того

навантаження;  $P_{T_k}$ ,  $U_k$  – відповідно тягове електроспоживання та напруга на струмоприймачі  $k$ -того навантаження;  $I_{T\Pi k}$  – частина тягового струму, споживаного від ТП;  $t_{\Pi}$ ,  $t_K$  – відповідно час початку і закінчення рекуперації.

В якості моделі ЕРС в режимі рекуперації використано модель керованого напругою (на струмоприймачі) джерела струму, що аналітично представлено як

$$I_P(U) = \begin{cases} I_P, & \text{при } U < U^{\max}, \\ I_P - I_{\text{надл. P}}, & \text{при } U = U^{\max}, \\ 0, & \text{при } U > U^{\max}, \end{cases} \quad (5)$$

де  $I_{\text{надл. P}} = f(U)$  – надлишковий струм рекуперації, що визначається сумісними тяговим розрахунком і розрахунком миттєвої схеми СТЕ.

Для зручності і розширення функціональних можливостей імітаційного моделювання взаємодії ЕРС в режимі рекуперації з системою тягового електропостачання (СТЕ) в середовищі MathLab розроблена динамічна модель тягової мережі, де рухомі джерела струму є зафіксованими в просторі, а вплив їх положення визначається зміною функцій опору тягової мережі. На рис. 6 наведено схему заміщення ділянки з консольним живленням та довжиною плеча  $x_0$  (випадок знаходження на ділянці трьох поїздів). Режим електроспоживання або рекуперації визначається напрямком струму джерела струму.

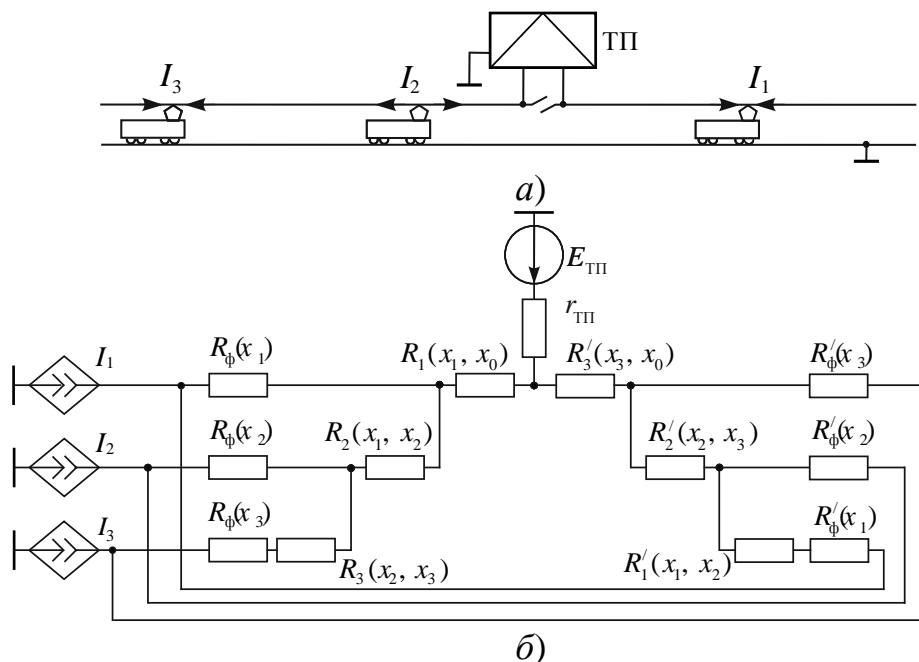


Рисунок 6 – Одноколейна ділянка СТЕ (а) та її миттєва схема заміщення (б)

Наприклад, опір тягової мережі між першим і вторим потягами на лівому плечі живлення в залежності від їх координат описується наступним виразом

$$R_2(x_1, x_2) = \begin{cases} r_0(x_1 - x_2), & \text{при } x_1 \leq x_0, x_2 \leq x_0, \\ r_0(x_0 - x_2), & \text{при } x_0 > x_1, x_2 \leq x_0, \\ 0, & \text{при } x_1 > x_0, x_2 > x_0, \end{cases} \quad (6)$$

де  $x_0$  – довжина міжпідстанційної зони;  $x_1, x_2$  – відстань відповідного поїзда до тягової підстанції.

Для прив'язки струму ЕРС до відповідного плеча живлення тягової мережі, що відповідає координаті поїзда відносно тягової підстанції, в модель введені фіктивні опори  $R_\phi$ , що для  $i$ -го поїзда на лівому плечі живлення дорівнюють

$$R_\phi(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq x_0, \\ \infty, & \text{при } x_i > x_0, \end{cases} \quad (7)$$

На рис. 7 представлена імітаційна модель СТЕ одноколійної ділянки (рис. 6), що створена в середовищі MathLab.

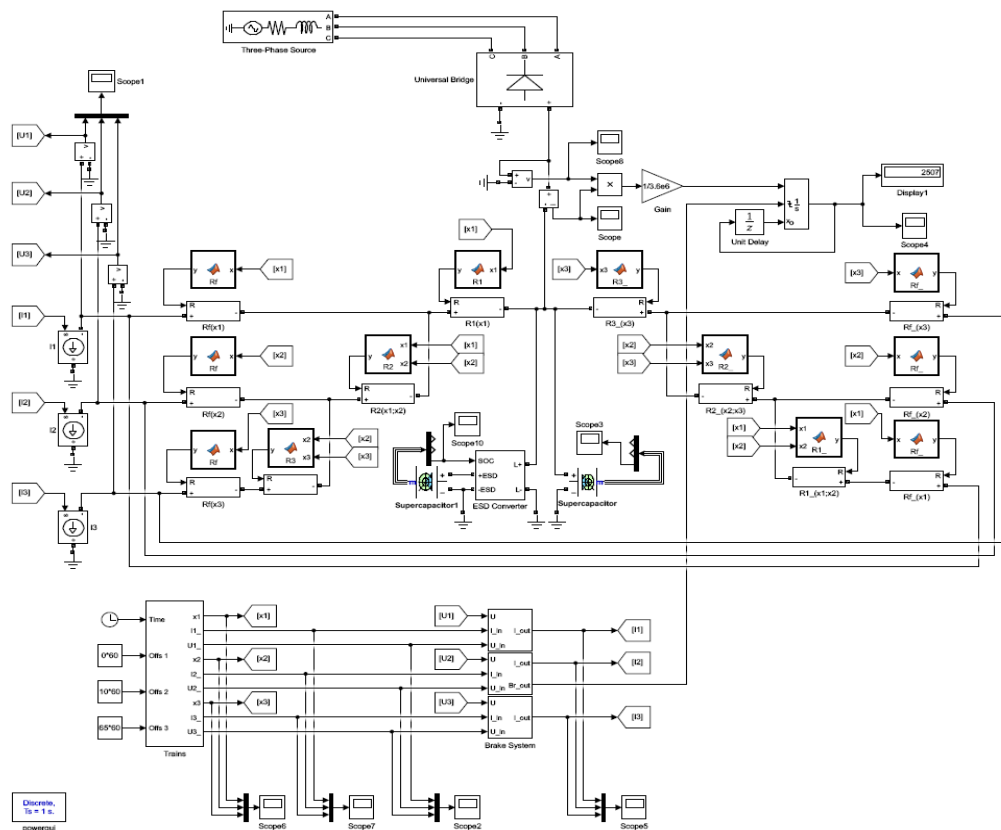


Рисунок 7 – Імітаційна модель СТЕ

Для дослідження ефективності накопичення енергії рекуперації в СТЕ до її моделі (рис. 6, 7) було введено накопичувач та аналітично описані його енергообмінні режими. Це дозволило надалі обирати раціональні закони управління параметрами процесу заряду-розряду, а саме: швидкістю й глибиною режиму. В якості накопичувача розглядався суперконденсаторний елемент, типова схема заміщення якого враховує струми витоку й активний опір.

Визначення напруги на накопичувачі  $U_H(t)$  в процесі його заряду від рекупруючого ЕРС виконувалося на основі отриманих при моделюванні дискретних законів зміни напруги на джерелі струму, згідно з моделлю (5). Напруга  $U(I_p)$  в часі є неперіодичною кусочно-неперервною функцією, тому для визначення закону зміни  $U_H(U(t))$  було використано інтеграл Дюамеля. В результаті

були отримані рекурсивні вирази напруги  $U_H(t)$  на ємності накопичувача при його заряді, що є справедливими для окремих інтервалів часу  $t_n \leq t < t_{n+1}$ . При кусочно-лінійній апроксимації  $U(t)$  вираз перехідної напруги на накопичувачі має вигляд

$$U_H(t) = \frac{R_B}{R + R_B} \sum_{n=1}^m \frac{U_{n+1} - U_n}{t_{n+1} - t_n} \left( (t_{n+1} - t_n) - \tau \left( e^{-\frac{t-t_{n+1}}{\tau}} - e^{-\frac{t-t_n}{\tau}} \right) \right), \quad (8)$$

де  $R, R_B$  – відповідно активний опір і опір витoku накопичувача;  $U_{n+1}, U_n$  – значення прикладеної напруги до накопичувача відповідно в моменти часу  $t_{n+1}$  і  $t_n$ ;  $\tau = RR_B C / (R + R_B)$  – постійна часу кола;  $C$  – ємність накопичувача.

Якщо безпосередньо приєднати накопичувач до тягової мережі або силового кола ЕРС, у точці приєднання після повного заряду накопичувач буде виконувати функцію стабілізатора напруги.

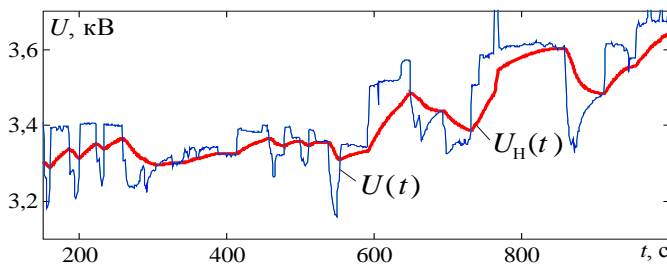


Рисунок 8 – Напруги на струмоприймачі електропоїзда  $U(t)$  та накопичувачі  $U_H(t)$

На рис. 8 представлена реалізація напруги на затискачах накопичувача приєданого до силового кола електропоїзда ЕПЛ2Т, отримана на основі виразу (8). Безпосереднє підключення накопичувача не дозволяє повністю використовувати його встано-

влену потужність та в цілому володіє низькою ефективністю, тому підключення реалізується за допомогою перетворювачів енергії (зарядно-розрядних пристроїв), що управляють енергообмінними режимами накопичувачів.

При моделюванні різних відстаней між поїздами були визначені залежності напруги на струмоприймачах ЕРС в режимі рекуперації та тяги від співвідношення струмів тяги  $I_T$  і рекуперації  $I_P$  (рис. 9, а). При відсутності пристроїв прийому надлишкової енергії рекуперації можливо лише реалізовувати струми рекуперації в межах  $(I_P / I_T) \leq 1$ , інакше порушується умова  $U \leq U^{\max}$  для рекуперуючого ЕРС. Данні залежності підтверджують, що при збільшені відстані між ЕРС зменшується ефективність використання енергії рекуперації, оскільки зростає напруга на струмоприймачі рекуперативного ЕРС. Так, при відстані між поїздами 15 км рекуперація енергії в мережу стає вже неможливою при струмі рекуперації  $0,8 I_T$ , тому при  $I_P > I_T$  необхідне застосування паралельної схеми реостатного гальмування. Для наведеного випадку при відстані між поїздами  $L_{рек} < 9,75$  км є можливість реалізувати рекуперацію у всьому діапазоні в межах умови  $(I_P / I_T) \leq 1$ , тому таку відстань при даних умовах можна вважати ефективною зоною рекуперації. В роботі встановлено, що функція напруги на струмоприймачі  $U^{тяг}(I_P / I_T)$  ЕРС в режимі тяги від відстані до рекуперуючого ЕРС не залежить (рис. 9, б).

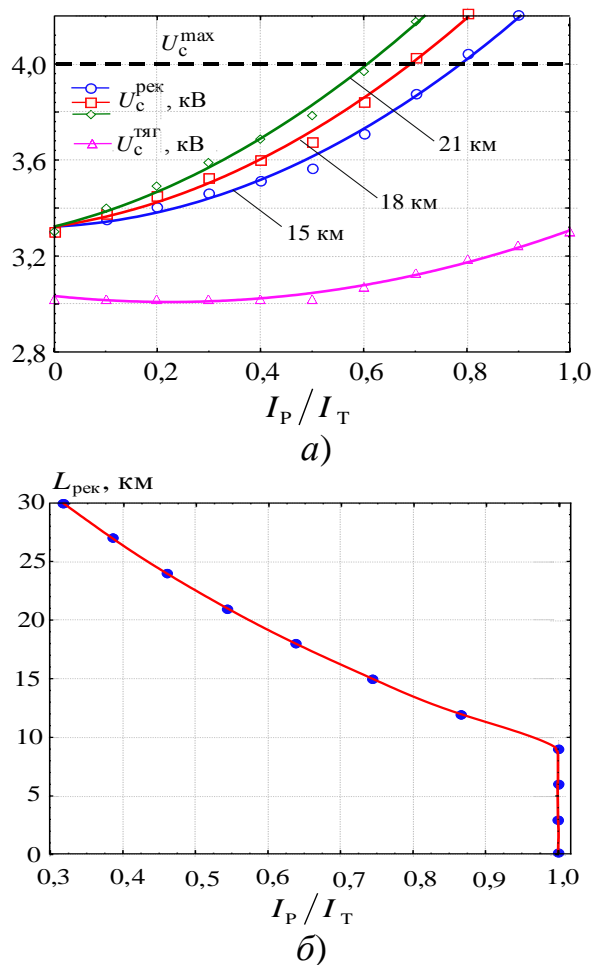


Рисунок 9 – Залежності напруги на струмоприймачах (а) та ефективної зони рекуперації (б) від співвідношення струмів рекуперації і тяги на ділянці

тягової мережі та за допомогою зарядно-розрядного перетворювача.

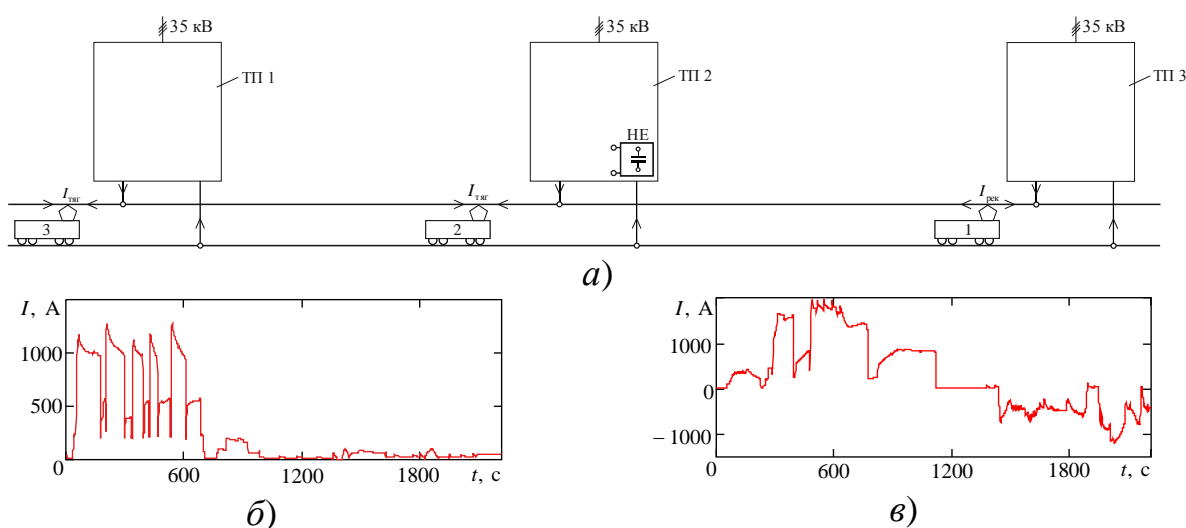


Рисунок 10 – Структурна схема ділянки, що моделювалася (а) та графіки струмів поїздів 1, 3 (б) та 2 (в)

Для дослідження ефективності споживання надлишкової енергії рекуперації на ділянках з ТП обладнаними накопичувачами на базі побудованої моделі були виконані багатоваріантні розрахунки СТЕ при різних графіках руху. На основі даних розрахунків було отримано залежності витрати електроенергії по вводам тягових підстанцій від ємності накопичувача. На рис. 10, а наведено схему досліджуваної одноколійної залізничної ділянки постійного струму (3,3 кВ) що складається з трьох ТП, одна з яких обладнана накопичувачем з енергоємністю 300 кВт·год. В якості прикладу розглянуто випадок одночасного перебування на кожній міжпідстанційній зоні одного поїзду зі струмовими профілями (рис. 10, б, в), при яких процеси тягового електроспоживання і рекуперації не співпадають в часі, що є розповсюдженим випадком. Моделювалися режими СТЕ при прямому підключенні накопичувача до

В результаті моделювання було виконано порівняння витрати енергії по вводу 35 кВ ТП 2 при наявності і відсутності на ній накопичувача, а також розглянуто раціональні межі розряду накопичувача при роботі на тягову мережу через зарядно-розрядний пристрій. Залежність відданої енергії накопичувачем в процесі його розряду на задане навантаження від напруги на його затискачах  $U_3$  представлено на рис. 11 та визначається виразом

$$E(U_3) = \int_0^{t(U_3)} p(t) dt = \int_0^{t(U_3)} u(t)i(t) dt = \int_0^{\frac{U}{RC} \ln U_3} U e^{-\frac{t}{RC}} I e^{-\frac{t}{RC}} dt, \quad (9)$$

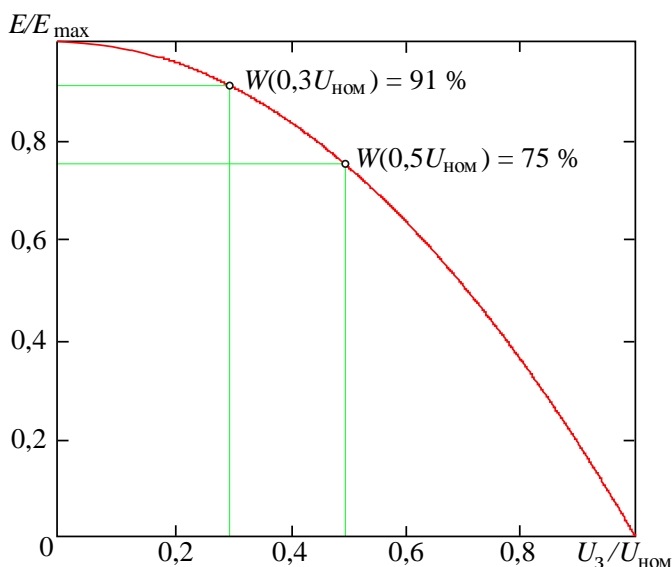


Рисунок 11 – Залежність залишкової енергії накопичувача від напруги на його затискачах (v %)

де  $R$ ,  $C$  – еквівалентний активний опір контуру розряду і ємність накопичувача.

Верхня межа інтегралу  $t(U_3)$  визначає час розряду накопичувача до значення напруги  $U_3$ . З рис. 11 видно, що, наприклад, при розряді до напруги 50 % від номінального значення, залишковий запас енергії накопичувача складає 25 %. При відсутності тягового електроспоживання в зоні рекуперації і НЕ на ТП, вся енергія, що рекуперується при гальмуванні поїзда на ділянці буде утилізуватися в реостатних або механічних гальмах поїзда.

При наявності НЕ дана енергія може частково або повністю поглинатися з подальшим поверненням в тягову мережу для підживлення тягових навантажень.

Таким чином при використанні накопичувачів енергії на тягових підстанціях та управління процесом їх заряду-розряду за напругою на шинах постійного струму витрата електроенергії на ввіді 35 кВ тягової підстанції знижується на 15...17 %, але енергія рекуперації в наслідок обмеженої енергоємності накопичувача ефективно використовується лише на 60...65 %. Для збільшення економічного ефекту потрібно або підвищувати енергоємність накопичувача, або розробляти більш досконалі способи управління режимами енергообміну.

**В четвертому розділі** розвинуті наукові принципи моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічного конструктивізму та метод нейро-нечіткого управління режимами систем тягового електропостачання при рекуперації енергії.

Відсутність строгої математичної моделі для розв'язання задачі раціонального використання енергії рекуперації та наявність невизначеності у режимах тягових навантажень зумовили необхідність застосування в роботі нейро-нечітких моделей, які включають в себе штучні нейронні мережі, експертні системи і нечітку логіку. Перешкодою для такого моделювання є значне різнома-

ніття потенційних можливостей сучасних пристроїв та їх розташування в системах тягового електропостачання. Для розробки методів оптимального управління пристроями розподілу енергії рекуперації в широкому спектрі існуючих і потенційних схем системи тягового електропостачання в роботі запропоновано використання апарату математико-алгоритмічного конструктивізму. Це дає можливість розробляти засоби і методи формування множин реальних і потенційних структурних схем систем тягового електропостачання з різною комплектацією і поїзною ситуацією для подальшого навчання нейрофазі-мереж на основі експертних рішень і формування раціонального керування обладнанням з метою ефективного використання енергії рекуперації.

Призначення конструкційно-продукційної структури полягає у формуванні множин конструкцій з допомогою операцій зв'язування, підстановки, виводу, що задаються правилами аксіоматики. Під конструкціями у даному випадку розуміються структурні схеми системи тягового електропостачання в зоні розподілу енергії рекуперації з відповідними поїзними ситуаціями. Узагальненою конструктивно-продукційною структурою (УКПС) є трійка

$$C_G = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle, \quad (10)$$

де  $M$  – неоднорідний носій алгоритмічної структури,  $\Sigma$  – сигнатура, що складається з множин операцій зв'язування, підстановки й виведення, операцій над атрибутами і відношення підстановки,  $\Lambda$  – конструктивна аксіоматика.

Правила підстановки мають вид

$$\Psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi, \quad (11)$$

де  $s_r$  – відношення підстановки,  $g_r$  – набір операцій над атрибутами.

Спеціалізація УКПС – конструктор моделі (структурної схеми) системи тягового електропостачання в зоні розподілу енергії рекуперації визначається як

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle_s \mapsto C_{ZR} \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_{ZR} \rangle, \quad (12)$$

де  $\Lambda_{ZR} \supset \Lambda_1$ ,  $\Lambda_1 = \{M_{ZR} \supset T_1 \cup N_1\}$ ,  $\Sigma_{ZR} = \{\Xi, \Theta, \Phi\}$  – множини:  $\Xi$  – відношень (і відповідних операцій) зв'язування елементів конструкцій,  $\Phi$  – операцій над атрибутами елементів,  $\Theta$  – операцій виведення,  $T_1, N_1$  – терміналів і нетерміналів.

Конкретизація конструктивно-продукційної структури полягає в розширенні аксіоматики множиною конкретних правил продукцій і завданні конкретних множин терміналів і нетерміналів

$$C_{ZRI} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_3, Z \rangle_K \mapsto C_{ZRIC} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_6, Z \rangle, \quad (13)$$

де  $\Lambda_{ZR} \supset \Lambda_3 \cup \Lambda_6$ .

Часткова аксіоматика  $\Lambda_6$  містить доповнення у вигляді терміналів алфавіту  $T_1$ , що являють собою елементи системи тягового електропостачання та їх параметри, а саме:  $U_{\min}^{\max} ES$  – система зовнішнього електропостачання з атрибутом  $U_{\min}^{\max}$  – діапазон напруги на ввіді тягових підстанцій;  ${}_{\eta, k, U_1, U_2} Tr$  – понижуючий трансформатор з атрибутами  $\eta$  – ККД,  $k$  – коефіцієнт трансформації,  $U_1, U_2$  – первинна і вторинна напруги;  ${}_{\eta, U_1, U_2} Vip$  – випрямно-інверторний перет-

ворювач ТП з відповідними атрибутами;  $\eta, E, E_{\max}, t_{\min}$   $ESD$  – накопичувач енергії з атрибутами  $E, E_{\max}, t_{\min}$  – відповідно поточна накоплена енергія, максимальна енергоємність та мінімальні час повного заряду (розряду);  $r_0, L, \bar{X}, n$   $Ts$  – тягова мережа з атрибутами:  $L$  – довжина ділянки,  $r_0$  – питомий опір мережі,  $\bar{X}$  – вектор розмірності  $n$ , що визначає структуру мережі (схема живлення, наявність перемичок на багатоколіїних ділянках тягової мережі та ін.);  $x, P$   $ERS$  електро рухомий склад з атрибутами  $x$  – положення на міжпідстанційній зоні,  $P$  – потужність;  $\eta, U_1, U_2, \bar{U}, n$   $Rn$  – регулятор вихідної напруги випрямляча,  $\bar{U}$  – вектор розмірності  $n$ , кожен елемент якого  $u_i$  – регульовані рівні вихідної напруги.

Аксіоматика  $\Lambda_6$  містить правила продукцій. Наприклад перше правило містить відношення, що зв'язує ділянку тягової мережі, для якої приймається рішення про управління енергією рекуперації, з двома тяговими підстанціями

$$\psi_1 = \langle s_1 = \langle \sigma \rightarrow_A (\alpha \times \beta \times \alpha) \rangle, g_1 = \langle \rangle \rangle, \quad (14)$$

де нетермінали  $\alpha$  розглядаються як тягові підстанції, а  $\beta$  – як тягова мережа.

В результаті виведення на підставі правил підстановки з урахуванням аксіоматики спеціалізованої структури  $C_{ZR}$  в роботі створено алгоритм багатоваріантної генерації структур СТЕ та отримано множину моделей обладнання СТЕ в зоні рекуперації для розробки узагальненого алгоритму раціонального управління обладнанням і розподілу енергії.

Для розв'язання задачі раціонального розподілу енергії рекуперації в СТЕ зі стаціонарними керованими накопичувачами енергії (НЕ) і інвертуючими ТП з плавним регулюванням вихідної напруги (рис. 12) було виконано декомпозицію надлишкового струму рекуперації на складові згідно виразу

$$I_{\text{надл. P}} = I_P - I_{P1} = \sum_{k=2}^5 I_{Pk}, \quad (15)$$

де  $I_P$  – повний струм рекуперації поїзда;  $I_{P1}$  – струм тягового електроспоживання в зоні рекуперації;

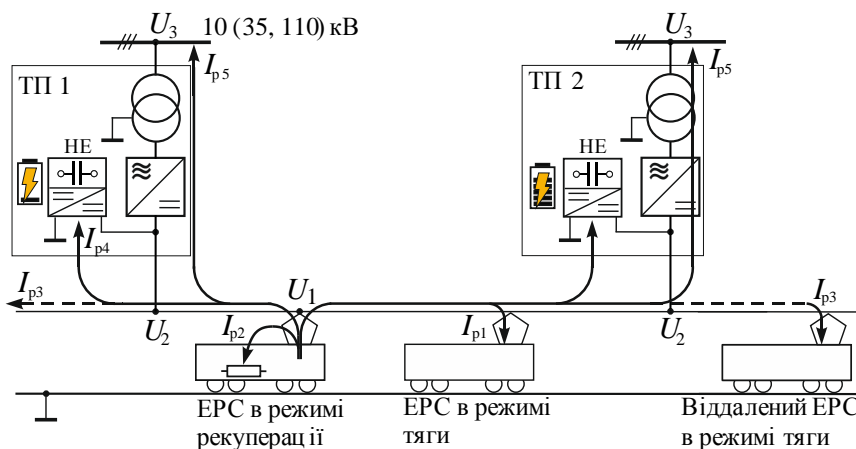


Рисунок 12 – Схема розподілу струму рекуперації в системах тягового і зовнішнього електропостачання

вання в зоні рекуперації;  $I_{P2}$  – струм, що утилізується в гальмі-вних пристроях;  $I_{P3}$  – струм, що може бути переданий до віддалених поїздів на суміжні фідерні зони при регулюванні напруги на шинах ТП;  $I_{P4}$  – струм, що споживається НЕ;  $I_{P5}$  – струм, що спожива-



ється системою зовнішнього електропостачання.

Згідно (4) втрати енергії рекуперації в тяговій мережі  $\Delta W_p(x_p) \rightarrow \min$  при  $x_p \rightarrow \min$ . Отже мінімізація втрат  $\Delta W_p$  в елементах систем тягового і зовнішнього електропостачання при розподілі енергії струмами  $I_{P3}$ ,  $I_{P4}$ ,  $I_{P5}$  між відповідними споживачами (рис. 12) досягається при мінімізації їх відстані до джерела рекуперації з урахуванням їх ККД та поточного енергетичного стану (поточних заряду накопичувача, завантаження живлячої мережі в точках приєднання ТП, віддаленості та величини тягового навантаження). Завдання раціонального розподілу полягає у визначенні значень складових струму (15), що забезпечить виконання мінімуму цільової функції

$$\left( \begin{array}{l} I_{P2}(t) \rightarrow 0 \\ \Delta W_p(I_{P3}(t), I_{P4}(t), I_{P5}(t)) \rightarrow \min \end{array} \right), \quad (16)$$

з урахуванням обмеження за допустимою напругою на струмоприймачі

$$U_1(I_{P3}(t), I_{P4}(t), I_{P5}(t)) \leq U^{\max}. \quad (17)$$

В роботі побудована нечітка модель розподілу енергії рекуперації в системі електротранспорту, що для одноколіїної ділянки з консольним живленням складається з п'яти блоків правил та має структуру, наведену на рис. 13.

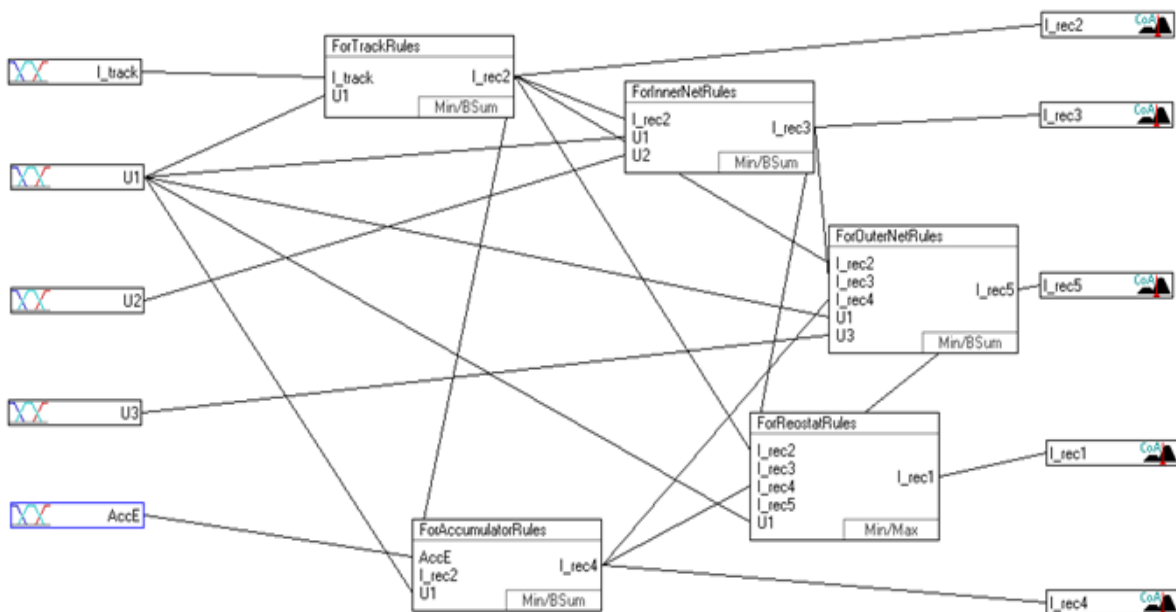


Рисунок 13 – Нечітка модель розподілу енергії рекуперації в межах однієї ТП

Вхідними даними моделі є набір змінних

$$X = \langle E(t), I_1(t), U_1(t), U_2(t), U_3(t) \rangle, \quad (18)$$

де –  $E(t)$  рівень заряду накопичувача;  $I_1(t)$  – тягове електроспоживання в зоні рекуперації;  $U_1(t)$  – напруга на струмоприймачі рекуперуючого поїзда;  $U_2(t)$  – напруга на шинах постійного струму ТП;  $U_3(t)$  – напруга на ввіді ТП.

Вихідними даними моделі є значення струмів

$$Y = \langle I_{P2}(t), I_{P3}(t), I_{P4}(t), I_{P5}(t) \rangle, \quad (19)$$

що є параметрами управління режимами зарядних пристроїв накопичувачів, інверторів і регуляторів напруги на шинах ТП.

Вхідні і вихідні змінні задаються нечіткими термами з трикутними функціями приналежності  $\mu_x(x)$  та мають відповідні області визначення, що розбиті переважно на п'ять нечітких термів: низький рівень величини; середньонизький; середній; середньовисокий; високий.

Кожен блок правил моделі використовує метод Мамдані для нечіткого виводу та побудований на логічних операціях. Блоки зв'язані у вигляді послідовності для забезпечення покрокового прийняття рішення за заданими пріоритетами. Вихід першого блоку служить входом для наступного, що дозволяє визначати необхідність розподілу залишку енергії за менш пріоритетними напрямками. Для останнього блоку виводу, служать входами всі попередні рішення, це дозволить визначити вивід тільки в тому випадку, якщо ще не було прийнято рішення. Зміст блоків нечітких правил приведено в табл. 5.

Таблиця 5 – Зміст блоків правил нечіткої моделі

Правило	Зміст правила
Включити накопичувач в режим заряду	$\begin{cases} I_{P4} \rightarrow I_P, (I_{P3} + I_{P5}) \rightarrow \min \text{ якщо } E = 0 \%, \\ I_{P4} \rightarrow \text{opt}, (I_{P3} + I_{P5}) \rightarrow \text{opt} \text{ якщо } E < 100\%, \\ I_{P4} = 0, (I_{P3} + I_{P5}) \rightarrow I_{\text{рек}} \text{ якщо } E = 100\%. \end{cases}$
Знизити напругу на шинах ТП в діапазоні $U_2 \geq U_2^{\min}$	$\begin{cases} I_{P3} \rightarrow I_P, I_{P5} \rightarrow \min, \text{ якщо } U_1 < U_1^{\max} \text{ при } U_2 \geq U_2^{\min}, \\ I_{P3} \rightarrow 0, I_{P5} \rightarrow I_P, \text{ якщо } U_1 = U_1^{\max} \text{ при } U_2 = U_2^{\min}. \end{cases}$
Увімкнути режим інвертування в межах допустимої напруги на вводі ТП $U_3 < U_3^{\max}$	$\begin{cases} I_{P5} \rightarrow I_P, \text{ якщо } U_3 < U_3^{\max}, \\ I_{P5} \rightarrow 0, I_P = I_{P2}, \text{ якщо } U_3 \geq U_3^{\max}. \end{cases}$
Включити реостатне (механічне) гальмування	$I_{P2} \rightarrow I_P \text{ при } E = 100\%, U_2 = U_2^{\min}, U_3 = U_3^{\max}$ <p>(розподіл енергії струмами <math>I_{P3}, I_{P4}, I_{P5}</math> за попередніми правилами неможливий)</p>

Для прийняття рішення про кількість енергії рекуперації, що передається, наприклад, до накопичувача для тимчасового зберігання, вхідними параметрами є змінні  $U_1(t)$  і  $E(t)$ , а виходом  $I_{P4}(t)$ . Знання експерта являють собою співвідношення виду:

$$R = (U_1, E) \rightarrow I_{P4}, \quad (20)$$

де  $(U_1, E)$  – посилення;  $I_{P4}$  – наслідок;  $\rightarrow$  – операція нечіткої імплікації.

Для кожного параметра відомі функції приналежності нечітких термів, відповідно  $\mu_{U_1 i}(x)$ ,  $\mu_{E i}(x)$  і  $\mu_{I_{P4} i}(x)$ . Ступінь приналежності конкретних вхідних значень  $(U_1, E)$  до кожного правила з експертної бази визначається виразом:

$$\mu_{I_{P4j}}(I_{P4}) = \mu_{Ej}(U_1) \wedge \mu_{I_{P4j}}(E), \quad (21)$$

де  $j = 1..n$  – номер правила;  $\wedge$  – операція логічного мінімуму.

В результаті отримуємо наступну нечітку множину

$$I_{P4} = \bigvee_{j=1..n} \mu_{I_{P4j}}(I_{P4j}), \quad (22)$$

де  $\bigvee$  – операція логічного максимуму.

Точне (чітке) значення параметрів змінної  $I_{P4}$  визначається як середньозважена сума

$$I_{P4} = \frac{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{P4j}}(I_{P4j}) I_{P4j}}{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{P4j}}(I_{P4j})}. \quad (23)$$

Для визначення чітких значень шуканих вихідних величин у роботі було використано метод дефазифікації «Центр площі». У результаті перебору множини варіантів різних вхідних станів моделі (рис. 13) згідно правил табл. 5 отримано простори прийняття рішень щодо розподілу струму рекуперації по всіх можливих каналах. На рис. 14 наведено приклади прийняття рішень про розподіл струму, геометричною інтерпретацією яких при фіксованих значеннях двох параметрів є поверхні.

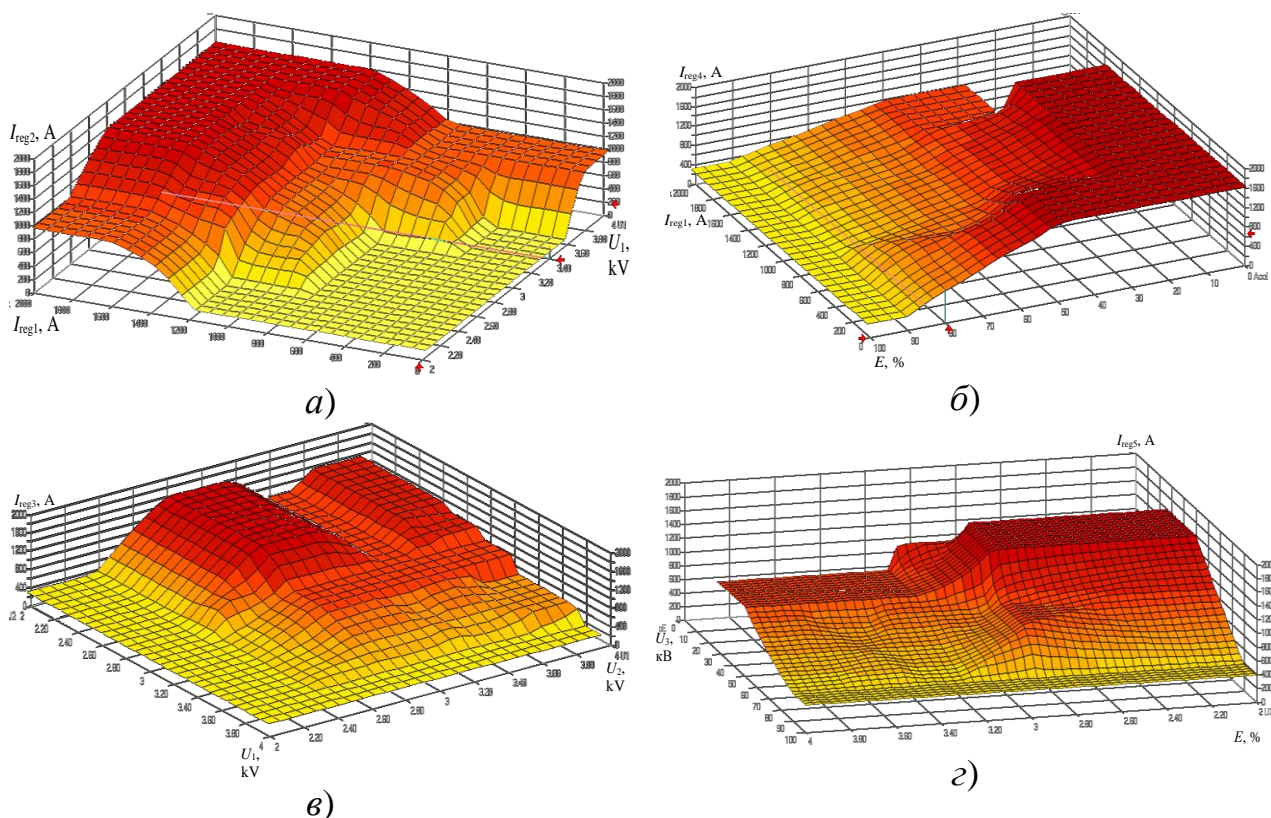


Рисунок 14 – Области визначення раціональних струмів рекуперації  $I_{P2} = f(I_{P1}, U_1)$  (а),  $I_{P4} = f(I_{P1}, E)$  (б),  $I_{P3} = f(U_1, U_2)$  (в),  $I_{P5} = f(E, U_3)$  (з)

Дані залежності відображають необхідні алгоритми управління силовим обладнанням ТП в реальному часі в залежності від поточного стану тягової і живлячої мереж (а саме рівня тягового навантаження в зоні рекуперації, заряду накопичувачів, напруги на вводах ТП).

В розділі також виконано навчання створеної моделі на основі розробленої багатошарової нейронної мережі з прямим поширенням сигналу. Навчання нейронної мережі дозволяє підвищити точність управління розподілом, ґрунтуючись на неповних даних отриманих системами вимірювань, що є основою інтелектуального управління режимами систем тягового електропостачання при рекуперації енергії.

**П'ятий розділ** присвячено вдосконаленню методу оцінки потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту за рахунок підвищенні ефективності використання енергії рекуперації та розробці рекомендацій по вдосконаленню системи обліку енергії рекуперації.

Потенціал енергозбереження визначається або для окремого  $i$ -го енергозберігаючого заходу в  $k$ -му ( $k \in K$ ) елементі (об'єкті) розглядуваної системи, або для множин таких заходів  $i \in I$ . Цей потенціал може розраховуватися як в абсолютному вираженні, так і у відносних одиницях

$$\Pi_{KI} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i}, \quad \Pi_{KI} = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i}}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B T_{k_i})}, \quad (24)$$

де  $\Pi_{KI}$ ,  $\Pi_{KI}$  – відповідно абсолютний і відносний потенціали енергозбереження;  $W_{k_i}^B$ ,  $W_{k_i}^P$  – витрата електроенергії на тягу відповідно до і після реалізації енергозберігаючих заходів;  $T_{k_i}$  – період часу, для якого розраховується зниження витрат енергії при відповідному енергозберігаючому заході.

Теоретичним (граничним) потенціалом енергозбереження при використанні рекуперації енергії в абсолютних одиницях є величина енергії, що визначається виразом (1). У відносних одиницях це буде виражати теоретичний коефіцієнт рекуперації  $k_p^{\text{теор}}$ , що визначається за виразом (3). Величина  $k_p^{\text{теор}}$  залежно від експлуатаційних показників ділянок зі шкідливими спусками може бути виражена як

$$k_p^{\text{теор}} = \frac{\Gamma_2 i_{\text{екв}} - w_0}{\Gamma_1 i_{\text{екв}} + w_0} \eta_p \gamma_p, \quad (25)$$

де  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$  – річні вантажопотоки відповідно в бік підйому і спуску, млн т/рік;  $\gamma_p$  – частка гальмівної сили рекуперації в загальній гальмівній силі поїзда при додатковому пригальмовуванні механічними гальмами.

При циклічному русі енергетичну ефективність рекуперації на ділянках з легким і середнім профілем доцільно розглядати як

$$k_p^{\text{теор}} = \left( 1 - \frac{v_k^2}{v_{\Pi}^2} \right) \eta_p. \quad (26)$$

Енергія рекуперації, що реалізується в умовах експлуатації  $W_p'$  в більшості випадків менше теоретичного потенціалу енергозбереження  $\Pi^{\text{теор}} = W_p$  і за наявності існуючого енергозберігаючого обладнання, є технічно-реалізованим потенціалом енергозбереження та дорівнює

$$\Pi^{\text{тех}} = W'_p = W_p k_{\text{СП}}, \quad (27)$$

де  $k_{\text{СП}} \in [0, 1]$  – коефіцієнт споживання енергії рекуперації.

Величина  $k_{\text{СП}}$  при відсутності на ТП пристроїв прийому надлишкової енергії рекуперації залежить переважно від розмірів руху на ділянці і напруги на шинах ТП та являє собою випадкову величину. Для транспортного засобу в режимі рекуперації величина  $k_{\text{СП}}$  визначає рівень напруги його на струмоприймачі, тобто

$$k_{\text{СП}}(U) = \begin{cases} 1, & \text{при } U < U^{\text{max}}, 0 < I_p \leq I_T, \\ 0, & \text{при } U \geq U^{\text{max}}, I_T = 0. \end{cases} \quad (28)$$

Проміжні значення величини  $k_{\text{СП}}$  в зазначеному діапазоні відповідають випадку з обмеженим тяговим електроспоживанням в зоні рекуперації, коли має місце надлишковий струм (енергія) рекуперації

$$I_{\text{надл. P}} = (I_p - I_T) > 0, \quad (29)$$

$$W_{\text{надл. P}} = \Pi^{\text{теор}} - \Pi^{\text{тех}} = \Pi^{\text{теор}}(1 - k_{\text{СП}}). \quad (30)$$

Таким чином, реалізація потенціалу енергозбереження при використанні процесу рекуперації енергії безпосередньо пов'язана з величиною  $k_{\text{СП}}$ , яка, власне, і формує енергозберігаючий ефект від процесу відновлення енергії в системах електрифікованого транспорту.

Наявність в СТЕ пристроїв прийому надлишкової енергії рекуперації, наприклад інверторів, як показали дослідження, не забезпечує гарантовано  $k_{\text{СП}} = 1$ , оскільки здатність системи зовнішнього електропостачання до прийому енергії  $W_{\text{надл. P}}$  залежить від рівня напруги на вводі ТП. Це вимагає розробки комплексного підходу до застосування існуючих заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації.

В роботі досліджено залежність величини  $k_{\text{СП}}$  від основних експлуатаційних та режимних параметрів систем тягового електропостачання (в тому числі при використанні сучасного і перспективного енергозберігаючого обладнання), де  $k_{\text{СП}}$  розглядався як функція багатьох змінних вигляду

$$k_{\text{СП}} = f(U_{\text{ТП12}}, U_{\text{вх}}, E, R_{\text{тм}}, N, P_T, x_p, x_T, v_{\text{ср}}), \quad (31)$$

де  $U_{\text{ТП12}}$  – середня напруга холостого ходу на шинах двох граничних ТП;  $U_{\text{вх}}$  – напруга на вводах ТП;  $E$  – поточний рівень заряду накопичувачів;  $R_{\text{тм}}$  – опір тягової мережі;  $N$  – розміри руху на ділянці;  $P_T$  – тягове електроспоживання в зоні рекуперації;  $x_p, x_T$  – відповідно координати поїздів в режимі рекуперації і тяги;  $v_{\text{ср}}$  – середня швидкість руху на ділянці.

В якості енергозберігаючих заходів щодо підвищення ефективності споживання енергії рекуперації в системі електричної тяги розглянуто варіанти використання регулювання графіків руху поїздів, встановлення на ТП окремо накопичувачів енергії, інверторів та регуляторів напруги, а також при наявності

на ТП всіх пристроїв одночасно із застосуванням розробленого в роботі нейро-нечіткого управління. Для розрахунків були використано розроблені моделі СТЕ при заданих експлуатаційних показниках ділянок, в результаті чого були отримані статистичні характеристики величини  $k_{СП}$ , що наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Основні статистичні характеристики коефіцієнта  $k_{СП}$

№ п/п	Енергозберігаюча технологія	$k_{СП}^{\min} \dots k_{СП}^{\max}$	$m_{k_{СП}}$	$\sigma_{k_{СП}}$
1	Оптимізація графіків руху	0,42...0,56	0,47	0,11
2	Використання інверторів на ТП	0,71...0,95	0,78	0,85
3	Використання накопичувачів на ТП	0,69...0,84	0,71	0,12
4	Використання регуляторів напруги на ТП	0,61...0,73	0,68	0,09
5	Одночасне використання п. 2, 3, 4	0,97...1,0	0,98	0,08

З табл. 6 видно, що при сумісному використанні інверторів, накопичувачів і регуляторів напруги та методів нейро-нечіткого управління їх режимами має місце практично повне використання енергії рекуперації ( $k_{СП} \rightarrow 1$ ). В даному випадку також досягається зниження встановленої потужності розглянутого енергозберігаючого обладнання.

На практиці важливе значення має економічно-доцільний потенціал енергозбереження. Граничною умовою економічної доцільності реалізації енергозберігаючого заходу є рівність додаткових витрат (інвестиційних, експлуатаційних та ін.) за життєвий цикл його реалізації, пов'язаних з впровадженням заходу  $Z_{ki}$  і сумарної вартості зекономлених енергоресурсів, що формалізується у вигляді

$$P_{KI}^{\text{ек}} = \sum_{t=0}^T \left( Z_{ki} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} C_t \cdot \Delta O_{kit} \right) \geq 0, \quad (32)$$

де  $P_{KI}^{\text{ек}}$  – економічно-доцільний потенціал енергозбереження;  $T$  – розрахунковий етап у періоді життєвого циклу;  $C_t$  – вартість електроенергії;  $\Delta O_{kit}$  – обсяг зекономленої електроенергії.

При реалізації потенціалу енергозбереження за рахунок використання енергії рекуперації в першу чергу доцільно реалізовувати організаційно-технологічні енергозберігаючі заходи, які не вимагають значних витрат. Одним із них є реалізація технічно-доступного потенціалу за рахунок оптимізації графіків руху поїздів і їх схем живлення контактної мережі, що дорівнює

$$P_{KI}^{\text{тех дост}} = F(k_i, U_{\text{ТП}}^{\text{opt}}, S^{\text{opt}}) - F(k_i, U_{\text{ТП}}^{\text{fact}}, S^{\text{fact}}), \quad (33)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт інтенсивності руху поїздів, що визначає завантаження тягової мережі, нерівномірність електроспоживання та ін.;  $S^{\text{opt}}$ ,  $S^{\text{fact}}$  – відповідно оптимальна та фактична схеми живлення.

У роботі також було виконано експериментальну оцінку теоретичного потенціалу енергозбереження при використанні рекуперації енергії в умовах

Дніпровського метрополітену. Для цього застосовано експериментально отримані в роботі реалізації потужності (рис. 15) та визначені відповідні їм коефіцієнти рекуперації для руху електропоїздів 81.717(714).5М.

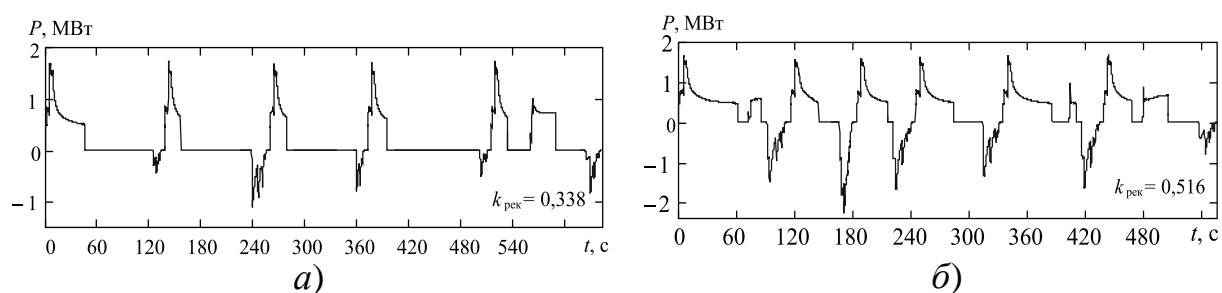


Рисунок 15 – Часові діаграми тягового електроживлення поїзда метрополітену 81.717(714).5М при русі за режимною картою (а) та в прискореному режимі (б)

Оцінка потенціалу рекуперації була виконана за енергію, генеровану електропоїздами при реостатному гальмуванні. Результати розрахунків відповідають значенню теоретичного потенціалу енергозбереження в метрополітені при використанні рекуперації енергії та наведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Показники електроживлення і рекуперації електроенергії в метрополітені

Напря́м	Режим руху							
	За режимною картою				Прискорений			
	$W_T$ , кВт·год	$W_P$ , кВт·год	$k_P$	$v_{cp}$ , км/год	$W_T$ , кВт·год	$W_P$ , кВт·год	$k_P$	$v_{cp}$ , км/год
В-К	36,52	5,25	0,144	40	56,12	18,95	0,338	46
К-В	26,44	10,15	0,384	36	43,15	22,27	0,516	45

Розбіжність розрахункових значень теоретичного потенціалу енергозбереження для метрополітену із результатами розрахунку для заданих параметрів ділянки метрополітену не перевищує 5 %.

Розроблені підходи щодо оцінки потенціалу енергозбереження в системах електрифікованого транспорту за рахунок підвищенні ефективності використання енергії рекуперації є важливим елементом вибору та наукового обґрунтування енергозберігаючих технологій та їх техніко-економічної оцінки на стадії прийняття передпроектних рішень що дозволить мінімізувати вартісні показники енергозберігаючих заходів.

У *шостому розділі* приведені практичні рекомендації щодо реалізації розроблених теоретичних положень дисертації, методів і технологій з підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту.

В розділі виконано вдосконалення системи управління режимами енергообміну накопичувачів енергії, розроблено алгоритми регулювання напруги на шинах постійного струму для розширення зони рекуперації, а також розроблено

структуру системи управління накопичувачами і інверторами при сумісній роботі та програмний комплекс по навчанню розробленої системи методам нейро-нечіткого управління.

На відміну від існуючих способів управління накопичувачами (за сигналом датчика напруги на шинах ТП), при яких накопичувач включається в режим заряду (розряду), стабілізуючи напругу на шинах в заданих межах, в розділі запропонована система, що складається зі зворотних зав'язків для вимірювання і порівняння споживаної потужності (струму) з тягової і зовнішньої мереж та датчиків напруги на шинах ТП і накопичувачі (рис. 16). Розроблена система дозволяє збільшити коефіцієнт завантаження накопичувачів до 0,8...0,9 на відміну від 0,3...0,5 при існуючому управлінні.

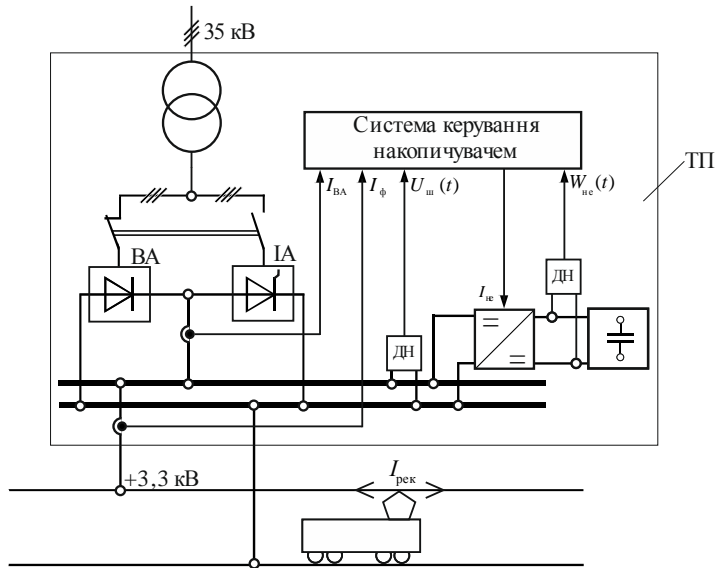


Рисунок 16 – Структурна схема управління режимом енергообміну накопичувача

ключенням до нерегульованих перетворювачів регульованих вольтододаткових пристроїв, а на нових напрямках, що електрифікуються – використанням керованих випрямлячів. Розроблені алгоритми регулювання напруги на шинах ТП дозволяють збільшувати дальність передачі енергії рекуперації тяговою мережею на 40...50 % в межах допустимої напруги на струмоприймачах транспортних засобів.

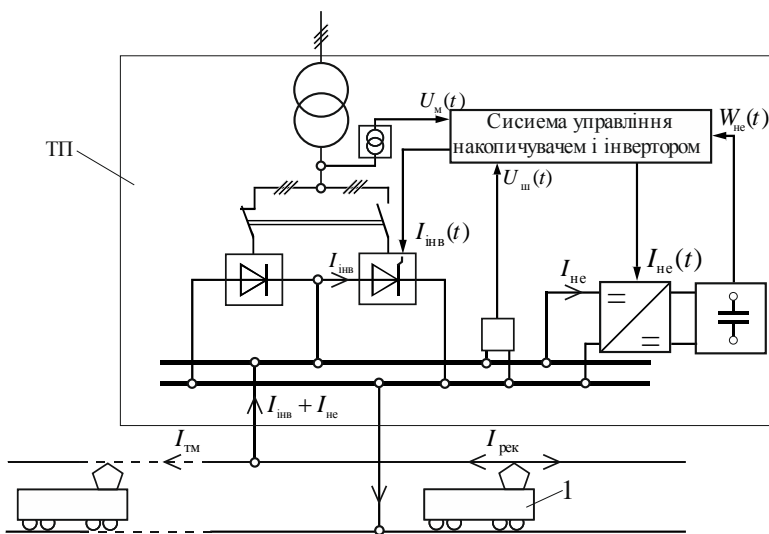


Рисунок 17 – Структура схема сумісного управління накопичувачем і інвертором

В розділі вдосконалені принципи керування електропостачання, що реалізовано на основі автоматичного регулювання напруги на шинах постійного струму ТП при рекуперації. Система може бути впроваджена на діючих ТП електрифікованих ділянок під-

ключенням до нерегульованих перетворювачів регульованих вольтододаткових пристроїв, а на нових напрямках, що електрифікуються – використанням керованих випрямлячів. Розроблені алгоритми регулювання напруги на шинах ТП дозволяють збільшувати дальність передачі енергії рекуперації тяговою мережею на 40...50 % в межах допустимої напруги на струмоприймачах транспортних засобів.

В роботі розроблено спосіб сумісної роботи інверторів та накопичувачів при розподілі енергії рекуперації. Спосіб полягає у нечіткому порівнянні напруги на стороні постійного і змінного струмів ТП та рівня заряду накопичувача, на основі чого обчислюються та регулюються значення вхідних струмів інвертора і зарядно-розрядного пристрою на-





1. У результаті виконаного у дисертації аналізу проблеми використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту встановлено, що рівень обсягів рекуперації енергії на сьогодні не перевищує 2...3 % від споживання енергії на тягу. Незначні обсяги рекуперації енергії пов'язані з тим, що основна частина парку експлуатованого ЕРС не обладнана системою рекуперативного гальмування, а система тягового електропостачання не дозволяє гарантовано споживати вироблену енергію. Аналіз існуючих технологій підвищення ефективності використання енергії рекуперації показав, що вони потребують енергоємного обладнання високої вартості та не можуть забезпечувати належного результату.
2. Досліджено статистичні характеристики режимів напруги в тяговій мережі і струмоприймачах ЕРС при рекуперації. Визначено, що відсутність тягового електроспоживання на ділянках при рекуперації викликає стрибки напруги на струмоприймачах і шинах ТП зі швидкістю 395...428 В/с, що в 3...4 рази менше ніж при комутаційних процесах. Це дозволило використовувати цю ознаку в якості параметра ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі, що дозволить вмикати пристрої розподілу (накопичувачі, інвертори) раніше, ніж спрацює реле максимальної напруги і переведе транспортний засіб в режим реостатного гальмування.
3. Експериментально доведено вплив режимів системи зовнішнього електропостачання на ефективність рекуперації енергії в тяговій мережі на ділянках з інвертуючими ТП та встановлено граничнодопустимий діапазон напруги на вводах ТП при якому не порушується режим рекуперації поїзда та забезпечується нормативний діапазон напруги на вводі тягової підстанції, що не впливає на роботу нетягових споживачів.
4. Визначені інтегральні показники, що характеризують якісний характер енергії рекуперації в різних видах руху. Коефіцієнт коливання  $k_k$  для метрополітену в межах 0,5...0,7 свідчить про низькостабілізований рівень генерованої енергії, а коефіцієнт форми  $k_f$  для трамваї – про збільшений в 2,1...2,8 рази рівень втрат рекуперативної енергії в опорі тяговій мережі над мінімальним рівнем. Короткочасність генерації ( $t_{cp\ max} = 4,7...8,7$  для метро) при безпосередній передачі енергії (інверторами) до системи зовнішнього електропостачання викликає стрибки напруги на вводі тягової підстанції що негативно впливає на роботу нетягових споживачів, приєднаних до загального вузла з ТП.
5. Розроблена імітаційна модель СТЕ на основі функцій опорів, де ЕРС при рекуперації представлено у вигляді рухомого нестабілізованого джерел енергії (керованого напругою джерела струму). Визначено залежності ефективної зони рекуперації від напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій, при яких забезпечується стійкий процес рекуперації на ділянках не обладнаних пристроями прийому надлишкової енергії рекуперації.
6. Розроблені підходи до управління енергообмінними режимами накопичувачів енергії, що дозволяють за рахунок збільшення коефіцієнту їх завантаження зменшити їх встановлену потужність та витати енергії на тягу. В результа-

ті моделювання встановлено, що при управлінні зарядно-розрядним процесом накопичувача знижується витрата енергії по вводу ТП на 15...17 %, що досягається за рахунок зменшення втрат в тяговій мережі і підвищення ефективності використання енергії рекуперації. Це дозволило дослідити граничні значення зниження втрат енергії при використанні накопичувачів з різними формами управління їх зарядно-розрядними режимами.

7. Розроблено принципи конструктивно-продукційного моделювання зони розподілу енергії рекуперації в системі тяги постійного струму, в результаті чого в роботі створено алгоритм багатоваріантної генерації структур СТЕ та отримано множину моделей обладнання СТЕ в зоні рекуперації для розробки узагальненого алгоритму раціонального управління обладнанням і розподілу енергії.
8. Розроблено метод управління накопичувачами енергії, інверторами та регуляторами вихідної напруги тягових підстанцій на базі нечіткої логіки, що дозволяє виконувати раціональний розподіл надлишкового струму рекуперації за критерієм мінімуму втрат енергії в системах тягового і зовнішнього електропостачання. При цьому забезпечуються необхідні умови рекуперації незалежно від наявності тягових навантажень на ділянці. Використання розробленого підходу є ефективним в умовах неповної інформації, одержуваної системами виміру, і за рахунок використання раціональних алгоритмів управління обладнанням дозволяє мінімізувати встановлену потужність потрібного енергозберігаючого обладнання, що зменшить капітальні витрати на модернізацію існуючих і електрифікації нових ділянок.
9. Вдосконалено метод визначення потенціалу енергозбереження при підвищенні ефективності рекуперації в системі електротранспорту на основі використання коефіцієнту споживання енергії рекуперації та встановлено його межі при впровадженні відповідних енергозберігаючих заходів. Це дозволяє на стадії передпроектних рішень виконувати техніко-економічне обґрунтування схемотехнічних рішень з підвищення ефективності використання енергії рекуперації.
10. Теоретично розраховано і експериментально підтверджено граничний потенціал енергозбереження від рекуперації енергії в умовах Дніпровського метрополітену, що становить в середньому 26...43 % від електроспоживання на тягу.
11. Вдосконалено систему обліку та нормування енергії рекуперації на електрифікованому транспорті в частині врахування рівня напруги на струмоприймачах і в тяговій мережі. Введення додаткових показників в систему нормування енергії рекуперації дає можливість розраховувати більш точні значення норм для конкретних ділянок та знаходити шляхи підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування.
12. В результаті проведеного моделювання і експериментальних досліджень встановлено, що використання в комплексі розроблених технологій на електрифікованих залізницях постійного струму за наявної комплектації парку електрорухомого складу системою рекуперативного гальмування дозволить

на 45...49 % збільшити обсяги рекуперації енергії від поточного стану, що в цілому може забезпечити зниження витрат енергії на тягу на 3,7...5,3 %.

***Основні положення і результати дисертації опубліковано***

***у монографії:***

1. Енергетика тягових мереж : монографія / В. Г. Сиченко, В. Г. Кузнецов, Д. О. Босий, О. І. Саблін ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Сиченка. – Дніпро : Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. – 210 с.

***У виданнях, що індексовані у міжнародній наукометричній базі Scopus:***

2. Kuznetsov V. Improvement of the regenerating energy accounting system on the direct current railways / V. Kuznetsov, O. Sablin, A. Chornaya // The archives of transport. – 2015. – Vol. 36, Iss. 4. – P. 35-42.
3. Rational distribution of excess regenerative energy in electric transport systems on the basis of fuzzy logic application / O. Sablin, V. Kuznetsov, V. Shinkarenko, A. Ivanov // The archives of transport. – 2017. – Vol. 42, Iss. 2. – P.7-17.
4. Intelligent Technologies for Efficient Power Supply in Transport Systems / D. O. Bosyi, O. I. Sablin, I. Yu. Khomenko, Y. M. Kosariev, I. Yu. Keбал, S. S. Myamlin // Transport Problems. – 2017. – № 12 (SE). – P. 57–71.

***У виданнях, що індексовані у міжнародних наукометричних базах Index Copernicus, Google Scholar та інших, що є фаховими виданнями України:***

5. Костин Н. А. Отрицательная активная мощность электроподвижного состава постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Гірничча електромеханіка та автоматика. – 2009. – № 83. – С. 32-36.
6. Саблин О. И. Влияние динамических режимов электропотребления электротранспорта на точность измерения электроэнергии / О. И. Саблин, А. И. Кийко // Гірничча електромеханіка та автоматика. – 2011. – № 86. – С. 12-16.
7. Петров А. В. Показники якості електричної енергії в лініях зовнішнього електропостачання системи електричної тяги постійного струму / А. В. Петров, О. І. Саблін // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – № 41. – С. 95-101.
8. Саблин О. И. Признаки наличия неактивной мощности в системе электрической тяги постоянного тока / О. И. Саблин // Восточно-европейский журн. передовых технологий. – 2012. – № 5/8 (59). – С. 26-29.
9. Саблин О. И. Определение составляющих полной мощности ЭПС на основе общих уравнений электромагнитного поля / О. И. Саблин // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХП». – 2012. – № 66. – С. 161-166.
10. Саблин О. И. Снижение избыточной мощности тягового средства в процессе движения / О. И. Саблин, В. В. Артемчук // Восточно-европейский журн. передовых технологий. – 2012. – № 6/8 (60). – С. 34-38.
11. Коефіцієнт потужності і реактивної потужності трамваїв / М. О. Костін, О. І. Саблін, О. Г. Шейкіна та ін. // Гірничча електромеханіка та автоматика. – 2013. – № 91. – С. 124-131.

12. Саблін О. І. Проблеми та перспективи ефективного використання рекуперації електроенергії в системі електротранспорту / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, В. В. Артемчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2013. – № 2. – С. 126-130.
13. Моделювання взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації електроенергії з розосередженою системою тягового електропостачання / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, О. І. Бондар та ін. // Електрифікація транспорту : наук. журн. – 2014. – № 7. – С. 46-54.
14. Саблін О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Восточно-европейский журн. передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9-13.
15. Саблин О. И. Повышение эффективности рекуперации электроэнергии электротранспорта при ограниченном тяговом электропотреблении / О. И. Саблин // Технологический аудит и резервы производства. – 2014. – № 6/1 (20). – С. 21-26.
16. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена / В. Г. Кузнецов, О. И. Саблин, П. В. Губский и др. // Гірничя електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ. – 2015. – Вип. 95. – С. 35-43.
17. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, Д. О. Босий, В. Г. Кузнецов та ін. // Вісн. Вінницького політехн. ін-ту. – 2016. – № 2. – С. 72-78.
18. Саблін О. І. Оптимізація режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії в системах електричного транспорту / О. І. Саблін // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 11. – С. 53-61.
19. Шинкаренко В. И. Конструктивное моделирование зоны распределения энергии рекуперации тяги постоянного тока / В. И. Шинкаренко, О. И. Саблин, А. П. Иванов // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 5 (65). – С. 125-135.
20. Кузнецов В. Г. Визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту в задачах підвищення ефективності споживання енергії рекуперації / В. Г. Кузнецов, О. І. Саблін // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 12. – С. 107-114.
21. Саблін О. І. Дослідження впливу режимів систем зовнішнього електропостачання на ефективність рекуперації енергії електрифікованого транспорту / О. І. Саблін // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2016. – № 12. – С. 42-48.

***У додаткових працях:***

22. Kostin N. Reactive Power and Non-Productive Losses of Electroenergy in electric Transport of the Direct current / N. Kostin, O. Sablin, O. Reutskova // Proceedings of IX international conference «Modern Electric Traction» (MET'2009) Poland, Gdansk, 2009. – P. 15-18.

23. Костін М. О. Вплив рекуперації та вибігу електрорухомого складу на його енергетичні показники / М. О. Костін, О. І. Саблін, А. В. Нікітенко // Електрифікація транспорту. – 2011. – № 2. – С. 44-46.
24. Розробка малогабаритних енергоощадних реакторів для тягових підстанцій електрифікованих залізниць / О. І. Бондар, І. Л. Бондар, О. І. Саблін та ін. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2011. – № 2. – С. 61-65.
25. Бондар О. І. Підвищення безпеки розподільчих установок об'єктів систем електропостачання залізниць шляхом розробки мультифункціонального контролюючого пристрою / О. І. Бондар, О. І. Саблін, Б. О. Шевцов // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – № 5. – С. 46-51.
26. Саблин О. И. Проблемы использования избыточной энергии рекуперации в системе электрической тяги / О. И. Саблин // Электромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – № 6. – С. 32-37.
27. Залізничний вагон для перевезення електромобілів з можливістю підзарядки: Пат.119315 Україна; МПК В61D 3/18 / Кебал І. Ю., Мямлін С. С., Босий Д. О., Саблін О. І., Хоменко І. Ю.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U201701809; заявл. 27.02.17; опубл. 25.09.17, Бюл. № 18. – 4 с.
28. Комп'ютерна програма «Автоматизована система прийняття рішень про розподіл надлишкової енергії рекуперації в системі електричного транспорту на основі нечіткої логіки»: Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 72577 / Саблін О. І., Половинко С. Г., Іванов О. П.; Україна / Зареєстровано 27.06.2017. – Київ : Мін-во економічного розвитку і торгівлі, 27-06-2017.
- Наукові праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:***
29. Саблин О. И. Критерии эффективности электропотребления электротранспорта / О. И. Саблин, В. В. Артемчук // Энергосбережение на железнодорожном транспорте : тезисы докл. III международной научно-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 70-71.
30. Саблин О. И. Интеллектуальные технологии повышения эффективности рекуперации энергии в системе электротранспорта / О. И. Саблин, В. Г. Кузнецов // Материалы международной научно-практ. конф. «Современные проблемы развития интеллектуальных систем транспорта». – Днепропетровск, 2014. – С. 116.
31. Саблін О. І. Сучасний стан проблеми використання рекуперації електроенергії в системі електричного транспорту / О. І. Саблін // «Енергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности» : материалы V международной научно-практ. конф. – Днепропетровск, 2014. – С. 129.
32. Саблін О. І. Принципи оптимального розподілення рекуперативної енергії в системі електротранспорту / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов // «ТРАНСЕЛЕКТРО-2014» : тезисы докл. VII международной научно-практ. конф. «Электрификация транспорта». – Днепропетровск, 2014. – С. 51.

33. Sablin O. Assessment of Energy Saving Potential in the Subway by Means of Energy Regeneration / O. Sablin, V. Kuznetsov // III Międzynarodowa Konferencja Naukowa «Najnowsze technologie w transporcie szynowym» (18.11-19.11.2014). – Warszawa, Jozefow. – P. 59.
34. Саблін О. І. Експериментальне дослідження ефективності застосування рекуперації електроенергії в умовах Дніпропетровського метрополітену / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, П. В. Губський // «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» : тезисы докл. 75-й Международной научно-практ. конф. – Днепропетровск, 2015. – С. 122.
35. Саблін О. І. Проблема обліку енергії рекуперації на залізницях / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, А. О. Чорна // «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» : матеріали VI міжнародної науково-практ. конф. – Воловець, 2015. – С. 73.
36. Саблін О. І. Аналіз ефективності рекуперації енергії в приміському русі поїздів / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, А. О. Чорна // «Енергозбереження на залізничному транспорті та в промисловості» : матеріали VI міжнародної науково-практ. конф. – Воловець, 2015. – С. 74.
37. Саблін О. І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, М. О. Баб'як // «Оптимальне керування електроустановками» : тези доп. III Міжнародної науково-техн. конф. – Вінниця, 2015. – С. 11.
38. Саблин О. И. Распределение избыточной энергии рекуперации в системе электрического транспорта с применением нечеткого управления / О. И. Саблин, А. П. Иванов, В. Г. Кузнецов // «Электрификация транспорта «ТРАНСЭЛЕКТРО-2015» : тезисы докл. VII международной научно-практ. конф. – Одесса, 2015. – С. 74-76.
39. Иванов А. П. Реализация системы принятия решения о распределении избыточной энергии рекуперации электровоза на основе нечеткой логики / А. П. Иванов, О. И. Саблин // «Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании» : тезисы IX международной научно-практ. конф. – Днепропетровск, 2015. – С. 77.
40. Sablin O. Fuzzy model of regeneration energy flow control in the system of electric transport / O. Sablin, V. Kuznetsov, A. Ivanov // 4th International Conference «Advanced Rail Technologies» (18.11–19.11.2015). – Warszawa, Josefow, 2015. – P. 111.
41. Саблін О. І. Підвищення ефективності режимів рекуперації енергії електро транспорту шляхом регулювання режимів тягового електропостачання засобами нечіткої логіки / О. І. Саблін // «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» : матеріали 76-ї Міжнародної науково-практ. конф. – Дніпро, 2016. – С. 83.
42. Саблін О. Регулювання напруги на шинах тягових підстанцій постійного струму в режимі рекуперації при обмеженому тяговому електроспоживанні

- на ділянках / О. І. Саблін, М. М. Пулін, В. Г. Кузнецов // «Енергооптимальні технології перевізного процесу» : тези доп. I Міжнародної науково-практ. конф. – Моршин, 2016. – С. 121.
43. Constructive simulation of regenerative power distribution zone in the dc electric traction system / O. I. Sablin, V. I. Shinkarenko, V. G. Kuznetsov, etc. // Najnowsze technologie w transporcie szynowym, Instytut Kolejnictwa, Warsaw, Poland, 18-19 November, 2016. – P. 105-106.
44. Саблін О. І. Принцип інтелектуального управління розподілом струму рекуперації транспортних засобів в системі тягового електропостачання / О. І. Саблін // «Енергооптимальні технології перевізного процесу» : тези доп. II Міжнародної науково-практ. конф. – Львів, 2017. – С. 46.
45. Саблін О. І. Вдосконалення систем електропостачання електрифікованого транспорту для забезпечення раціональних умов рекуперації енергії транспортних засобів / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов // «Оптимальне керування електроустановками» : тези доп. IV Міжнародної науково-техн. конф. – Вінниця, 2017. – С. 47.
46. Sablin O. Energy-efficient technology of excess regeneration energy distribution in perspective traction power supply systems / O. Sablin, V. Kuznetsov // Najnowsze technologie w transporcie szynowym, Instytut Kolejnictwa, Warsaw, Poland, 20-21 November, 2017. – P. 109-110.
47. Саблин О. И. Выбор рациональных энергообменных режимов работы накопителей энергии в системах тягового электроснабжения / О. И. Саблин, Д. А. Босый // «Проблемы безопасности на транспорте» : материалы VIII Международной научно-практ. конф. – Гомель, 2017. – С. 145.

## АНОТАЦІЯ

Саблін О. І. Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.09 – електротранспорт. – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту шляхом розробки наукових основ вибору раціональних енергозберігаючих технологій для реалізації максимального потенціалу енергозбереження при використанні режимів рекуперації, що є актуальною проблемою транспорту. Теоретично й експериментально досліджено фактори, що впливають на ефективність процесу споживання енергії рекуперації в системах електричного транспорту. Побудовано імітаційні моделі взаємодії транспортних засобів в режимі рекуперації із системою тягового та зовнішнього електропостачання, що враховують існуючі обмеження щодо граничних значень напруги на струмоприймачах та гнучкість розподілу енергії для забезпечення заданих обмежень. Вдоско-



налено науковий метод оцінки потенціалу енергозбереження при використанні рекуперації енергії в системах електрифікованого транспорту. Розвинуто методологію моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічного конструктивізму, на базі якої запропоновано науковий метод раціонального (інтелектуального) управління розподілом енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту за енергетичним критерієм із використанням експертних систем та нейро-нечіткої логіки, що дозволяє максимально використовувати потенціал енергозбереження в умовах неповної інформації про режими систем тягового і зовнішнього електропостачання.

*Ключові слова:* рекуперація електроенергії, тягове електропостачання, зовнішнє електропостачання, тягове електроспоживання, тягові підстанції, накопичувачі енергії, інвертори, регулятори напруги, нейро-нечітке управління, енергоефективність.

### ANNOTATION

Sablin O.I. Development of methods and means for improvement of the energy regeneration efficiency in the electric transport system. - Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Engineering, specialty 05.22.09 - electric transport. - Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2018.

The thesis is devoted to the solution of the scientifically applied problem of the efficiency of the energy regeneration process in electrified transport systems by developing scientific bases for the choosing of rational energy-saving technologies for the implementation of the maximum energy saving potential with different regeneration modes, which is an relevant transport problem. Theoretical and experimental research in the thesis is aimed at the development of scientifically based methods, technological solutions, expert and simulation models, integration of modern electrical equipment and information systems to improve the energy efficiency of energy regeneration modes and reduce the specific fuel costs and energy sources during transportation.

The author theoretically and experimentally investigated and systematized according to the degree of influence the factors influencing the efficiency of the energy regeneration process in electric transport systems. It is established that the decisive factor in the efficiency of energy regeneration and the actual volume of energy return to the traction line is the voltage on the pantograph of the vehicle, which depends on many factors, including random ones. The analysis of existing methods for increasing the efficiency of energy regeneration in electric transport systems has been carried out, and promising directions for their improvement have been determined in terms of complementing modern energy equipment, optimizing its operation modes based on information technologies.

In the DC traction power supply system with inverting traction substations, the influence of external power supply systems on the efficiency of the regeneration

modes during its return to the external network has been experimentally proved. It is established that the consumption of excess energy regeneration by the external power supply system (at 10, 35, 110 kV connections) depends on the modes of non-traction consumers in the nodes of connection of traction substations and the power factor of the inverter, which should be especially taken into account when the power system is underloaded.

The simulated models of interaction of vehicles in the mode of regeneration with traction and external power supply system were constructed, taking into account the voltage limitations on pantograph and the flexibility of energy distribution to ensure the specified limitations. Improved the calculation method for traction power supply systems in current distribution of energy regeneration that allows to select the rational distribution channels of energy regeneration on the basis of efficiency criteria and to determine the effect of regeneration on key performance indicators of traction power supply system. On the basis of this, rational operating modes of energy-saving equipment are determined, namely the depth and speed of discharge of energy storage devices, the output power of inverters.

It was improved the scientific method for estimating the energy saving potential using energy regeneration in electrified transport systems and its dependence on the energy consumption regeneration coefficient that is a function of the train situation on the site, the voltage on the TS buses, the energy capacity of the excess energy receivers, the traction line configuration. On the basis of this, it is proposed to carry out a scientifically-based choice of energy-saving technologies for increasing the efficiency of energy regeneration in electrified transport systems and their technical and economic assessment.

It was developed the methodology for simulating the energy distribution zone of regeneration on the basis of mathematical and algorithmic constructivism, which allows to put and suggest approaches for solving several classes of problems: the rational arrangement of energy-saving equipment in the traction line, the choice of their rational parameters and control algorithms. A scientific method of rational (intelligent) control of the distribution of energy regeneration in electrified transport systems based on the energy criterion based on expert systems and neuro-fuzzy logic is proposed, which allows to distribute the excess regeneration energy in traction and external power supply systems under conditions of incomplete information on their modes with a minimum of energy losses.

On the basis of the research are proposed the scientifically based technologies and methods for increasing the efficiency of energy regeneration, consisting in choosing a rational range of voltages at the inputs of traction substations to return energy to the external power supply system, substantiating rational energy exchange modes of operation of energy storage devices, making maximum use of their installed capacity, principles stabilization of the output power of the inverters when operating on a power supply network in conjunction with a storage device, where the latter act as the output power stabilizer of inverter, output voltage regulation on traction substations for regeneration of excess current to remote traction loads, which will increase the energy regeneration for 10...15%. As a tool for the development of relevant recom-

mendations are developed software systems that allow to teach energy management equipment systems depending on the multi-variant power supply system at the expert level under conditions of incomplete information about modes of traction and external power supply systems. In general, the methods and principles developed in the thesis can be used as a tool for constructing the Smart Grid of electrified transport systems.

Keywords: power regeneration, traction power supply, external power supply, traction power consumption, traction substations, energy storage devices, inverter converters, voltage regulators, neuro-fuzzy control, energy efficiency.

**САБЛІН ОЛЕГ ІГОРОВИЧ**

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ  
ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ  
В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Підписано до друку 25.04.2018

Формат паперу 60x84 1/16. Ум. др. арк. 1,9.  
Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 пр. Зам. № \_\_\_\_.

Дніпропетровський національний університет  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.03.

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