

Міністерство освіти і науки України  
Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Саблін Олег Ігорович**

УДК 621.331:621.332

ДИСЕРТАЦІЯ

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

Спеціальність 05.22.09 – електротранспорт  
Галузь знань 27 – транспорт

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Саблін О.І.

Науковий консультант Кузнецов Валерій Геннадійович, доктор технічних наук,  
професор

Дніпро – 2018

## 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 (27 – транспорт). – Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми ефективності процесу рекуперації енергії в системах електрифікованого транспорту шляхом розробки наукових основ вибору раціональних енергоощадних технологій для реалізації максимального потенціалу енергозбереження при використанні режимів рекуперації, що є актуальною проблемою транспорту. Теоретичні та експериментальні дослідження дисертації спрямовані на розробку науково обґрунтованих методів, технологічних рішень, експертних і імітаційних моделей, інтеграції сучасного електротехнічного обладнання і інформаційних систем для підвищення енергоефективності режимів рекуперації енергії і зниження питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів в процесі перевезень.

Теоретично і експериментально досліджено фактори що впливають на ефективність процесу рекуперації енергії в системах електричного транспорту та систематизовано їх по ступеню впливу. Встановлено що визначальним фактором ефективності використання енергії рекуперації і власне обсягів повернення енергії в тягову мережі виступає напруга на струмоприймачі рекуперуючого транспортного засобу, яка залежить також від множини факторів, в тому числі випадкових. Запропоновано комплексний підхід до оцінки ефективності процесу рекуперації енергії, що враховує не тільки енергозберігаючий ефект від нього, а і збитки від негативного впливу на суміжні підсистеми електричного транспорту. Виконано аналіз стану існуючих методів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електричного транспорту та визначені перспективні напрями їх вдосконалення, доповнення сучасним енерге-

тичним обладнанням, оптимізація режимів його роботи на основі інформаційних технологій.

Експериментально доведено вплив на ефективність рекуперації енергії в системі електричної тяги постійного струму з інвертуючими тяговими підстанціями режимів систем зовнішнього електропостачання при поверненні до них енергії. Встановлено що споживання надлишкової енергії рекуперації поїздів системою зовнішнього електропостачання (на приєднаннях 10, 35, 110 кВ) залежить від режимів нетягових споживачів у вузлах приєднання ТП залізниць та коефіцієнта потужності інвертора, що особливо потрібно враховувати коли енергосистема є недовантаженою. Також встановлено, що при підключенні суміжних інвертуючих ТП до ліній різного класу напруги має місце нерівномірний розподіл завантаження суміжних ТП в режимі рекуперації, що збільшує втрати генерованої енергії в тягових мережах залізниць.

Побудовані імітаційні моделі взаємодії транспортних засобів в режимі рекуперації з системою тягового електропостачання, що враховують існуючі обмеження щодо граничних значень напруги на струмоприймачах та гнучкість розподілу енергії для забезпечення заданих обмежень. Вдосконалено метод розрахунку систем тягового електропостачання в частині аналізу струморозподілу енергії рекуперації, що дозволяє обирати раціональні канали розподілу надлишкової енергії рекуперації за заданими критеріями ефективності та визначати вплив рекуперації на основні показники роботи СТЕ. На основі цього визначені раціональні режими роботи енергозберігаючого обладнання, а саме глибина та швидкість розряду накопичувачів, вихідна потужність інверторів. Визначена ефективна зона рекуперації в функції коефіцієнта споживання, при якій забезпечується стійкий генераторний струм  $E_{PC}$  при обмеженні максимальної напруги на струмоприймачі у всьому діапазоні значень  $k_{сп}$ .

Вдосконалено науковий метод оцінки потенціалу енергозбереження при використанні рекуперації енергії в системах електрифікованого транспорту та на основі регресійного аналізу встановлено його залежність від коефіцієнта споживання енергії рекуперації в СТЕ, який є функцією поїзної ситуації на

ділянці, напруги на шинах ТП, енергоємності приймачів надлишкової енергії. На основі цього пропонується виконувати науково-обґрунтований вибір енергозберігаючих технологій для підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту та визначення їх техніко-економічної доцільності. Експериментально визначено теоретичний, технічно-реалізований та економічно-доцільний потенціал енергозбереження для Дніпропетровського метрополітену при існуючих і збільшених в перспективі розмірах руху, що склав відповідно 14...34 % (на підйомі 8 %) і 38...52 % у (на відповідному спуску) напрямках, тобто в середньому 26...43 % від електроспоживання на тягу поїздів, що практично узгоджується з теоретичними розрахунками.

Розроблена методологія 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 в тяговій мережі, вибору їх раціональних параметрів та алгоритмів управління. Запропоновано науковий метод раціонального (інтелектуального) управління розподілом енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту за енергетичним критерієм на основі експертних систем та нейро-нечіткої логіки, що дозволяє максимально використовувати потенціал енергозбереження в умовах неповної інформації про режими систем тягового і зовнішнього електропостачання. Запропоновано науковий принцип, що дозволяє в залежності від багатоваріантності структури системи тягового електропостачання та наповнення її відповідним енергозберігаючим обладнанням реалізовувати інтелектуальне управління режимами енергообміну накопичувачів, роботи інверторів та регуляторів вихідної напруги підстанцій при рекуперації енергії.

На основі виконаних досліджень запропоновані науково-обґрунтовані технології та методи підвищення ефективності використання енергії рекуперації, що полягають у виборі раціонального діапазону напруг на вводах тягових підстанцій, при яких доцільно повернення енергії в систему зовнішнього електро-

постачання, обґрунтування раціональних енергообмінних режимів роботи накопичувачів енергії, що дозволяють максимально використовувати їх встановлену потужність, принципи стабілізації вихідної потужності інверторів при роботі на живлячу мережу сумісно з накопичувачами, де останні виступають в якості стабілізатору вихідної потужності інверторів, регулювання вихідної напруги тягових підстанцій щодо забезпечення максимальних перетоків надлишкового струму рекуперації на суміжні міжпідстанційні зони до віддалених тягових навантажень, що дасть можливість збільшити обсяги рекуперації енергії на 10...15 %. В якості інструментарію для розробки відповідних рекомендацій виступають розроблені в програмні комплекси, що дозволяють навчати системи керування енергозберігаючим обладнанням в залежності від багатоваріантності структури системи тягового електропостачання на експертному рівні в умовах неповної інформації про режими систем тягового та зовнішнього електропостачання. В цілому розроблені в дисертації методи та принципи можуть бути використані в якості інструментарію для побудови Смарт Грід систем електрифікованого транспорту в подальшому.

*Ключові слова:* рекуперація електроенергії, тягове електропостачання, зовнішнє електропостачання, тягове електроспоживання, тягові підстанції, накопичувачі енергії, інверторні перетворювачі, регулятори напруги, нейро-фазі керування, енергоефективність.

### **СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

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.
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. Kebal, S. S. Myamlin // Transport Problems. – 2017. – № 12 (SE). – P. 57–71.
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 «ХПІ». – 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. // Гірничча 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 реку-

- перації / 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.
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. Саблін О. И. Проблемы использования избыточной энергии рекуперации в системе электрической тяги / О. И. Саблин // Електромагнітна 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.
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. – Днепропетровськ, 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 // «Энергосбережение 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 раз-

- вития 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, A. P. Ivanov // 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.

## 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 (27 – 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. A comprehensive approach to the evaluation of the efficiency of the energy regeneration process is proposed, taking into account not only the energy saving effect, but also the negative impact on adjacent electric transport subsystems. 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. It is also established that when connecting adjacent inverting TSs to lines of different voltage classes, there is an uneven load distribution of adjacent TSs in the regeneration mode and the presence of equalizing currents in the traction line, which increases power losses.

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. The effective regeneration zone is determined depending on the voltage on the buses of traction substations and the ratio of traction and regeneration currents at the section at which a stable regenerative current is provided, while limiting the maximum voltage on pantograph in the entire range of permissible regeneration currents.

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. The theoretical energy saving potential for the Dnieprovkiy metro was experimentally determined with the existing and increased traffic (in the future), which is 14 ... 34% (on the incline 8 ‰) and 38 ... 52% in (on the appropriate descent) directions, which within the accuracy of engineering calculations is consistent with the theoretical values.

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. Based on the proposed control methods, it is obtained that the energy regeneration factor can be ensured in the range of 0.97 ... 1.0, which makes it possible to practically fully realize the technical potential of energy saving, depending on the technical equipment of the traction power supply system.

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 recommendations 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-phase control, energy efficiency.

### **LIST OF PUBLICATIONS OF THE APPLICANT TESTIFYING THE TESTING OF THE DISSERTATION MATERIALS**

1. Power of traction networks: monograph / V. G. Sichenko, V. G. Kuznetsov, D. A. Bosoy, O. I. Sablin ; for zag. ed. d-RA tekhn. Sciences, Professor V. G. Sichenko. Dnipro : Izd-vo PF "Standard-Service", 2017. - 210C.
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, etc. // 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. Kebal, S. S. Myamlin // Transport Problems. - 2017. - № 12 (SE). - P. 57-71.

5. Kostin N. A. Negative active power of electric rolling stock DC / N. A. Kostin, O. I. Sablin // Mining electromechanics and automation. - 2009. - №83. - P. 32-36.
6. Sablin O. I. Influence of dynamic modes of electric power consumption on the accuracy of measurement of electricity / O. I. Sablin, A. Y. Kiyko // Mining electromechanics and automation. - 2011. - №86. - P. 12-16.
7. Petrov A.V. Indicators of quality of electric energy in the lines of external power supply of DC electric traction system / A.V. Petrov, O. I. Sablin // Visn. Dnepropetr. NAT. UN-tah.d. Tr. they. Akad. V. Lazaryan. - 2012. - №41. - P. 95-101.
8. Sablin O. I. Signs of presence of inactive power in the DC electric traction system / O. I. Sablin // East European journal. high technology. - 2012. - № 5/8 (59). - P. 26-29.
9. Sablin O. I. Determination of the components of the total power of the EPS based on the General equations of the electromagnetic field / O. I. Sablin // Visn. NAT. Techn. UN-TA "KPI". - 2012. - №66. - P. 161-166.
10. Sablin O. I. Reducing the excess power of the traction means in the process of movement / O. I. Sablin, V. V. Artemchuk // East European journal. high technology. - 2012. - № 6/8 (60). – Pp. 34-38.
11. Power and reactive power factor of trams / M. O. Kostin, O. I. Sablin, O. G. Sheikina, etc. / Mountain electromechanics and automation. - 2013. - №91. – Pp. 124-131.
12. Problems and prospects of effective use of electric power recovery in the system of electric transport / O. I. Sablin, V. G. Kuznetsov, V. V. Artemchuk // Optoelectronic information and energy technologies. - 2013. - № 2. - P. 126-130.
13. Modeling of interaction of electric rolling stock in the mode of electric power recovery with the distributed system of traction power supply / O. I. Sablin, V. G. Kuznetsov, O. I. Bondar, etc. // electrification of transport : Sciences. Journ. - 2014. - № 7. - P. 46-54.
14. Sablin O. I. Research of efficiency of process of recovery of electric power in terms of the underground / O. I. Sablin // East European journal. high technology. - 2014. - № 6/8 (72). – Pp. 9-13.



15. Sablin O. I. Improving the efficiency of electric power recovery in electric transport with limited traction power consumption / O. I. Sablin // Technology audit and production reserves. - 2014. - No. 6/1 (20). - P. 21-26.
16. Analysis of energy saving reserves in the implementation of the energy recovery system on trains of the Dnepropetrovsk metro / V. G. Kuznetsov, O. I. Sablin, P. V. Gubskiy, etc. // Mining electromechanics and automation. Scientific and technical collection of NSU. - 2015. - Issue. 95. - P. 35-43.
17. Efficiency of electric power recovery in the system of electric transport with inverter traction DC substations / O. I. Sablin, D. O. Bosyi, V. G. Kuznetsov etc.// Vicn. Vinnitsa politehn. in-Tu. - 2016. - № 2. - P. 72-78.
18. Optimization of modes of traction power supply and energy recovery in systems of electric transport / O. I. Sablin // electrification of transport. - 2016. - № 11. - P. 53-61.
19. Shinkarenko V. I. Constructive modeling of zones of distribution of energy recovery of traction DC / V. I. Shinkarenko, O. I. Sablin, A. P. Ivanov // Science and progress of transport. - 2016. - № 5 (65). - C. 125-135.
20. Kuznetsov V. G. Determination of energy saving potential in electric transport systems in the problems of improving the efficiency of energy recovery / V. G. Kuznetsov, O. I. Sablin // electrification of transport. - 2016. - № 12. - P. 107-114.
21. Sablin O. I. Study of the influence of external power supply systems modes on the energy recovery efficiency of electrified transport / O. I. Sablin // electromagnetic compatibility and safety in railway transport. - 2016. - № 12. - P. 42-48.
22. N. Kostin 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. Kostin N. A. The influence of recovery and run-out of electric rolling stock on its energy performance / N. A. Kostin, O. I. Sablin, A.V. Nikitenko // Electrification of transport. - 2011. - № 2. - P. 44-46.

24. Development of small-sized energy-saving reactors for traction substations of electrified Railways / O. I. Bondar, I. L. Bondar, O. I. Sablin, etc. // Electromagnetic compatibility and safety in railway transport. - 2011. - № 2. - P. 61-65.
25. Bondar O. I. improving the safety of distribution installations, objects of power supply systems of Railways by developing multi-functional control device / O. I. Cooper, O. I. Sablin, B. A. Shevtsov // Electromagnetic compatibility and safety in railway transport. - 2013. - № 5. - P. 46-51.
26. Sablin O. I. Problems of using excess energy recovery in the electric traction system / O. I. Sablin // Electromagnetic compatibility and safety in railway transport. - 2013. - № 6. - P. 32-37.
27. Rail car for transportation of electric vehicles with the possibility of recharging: Pat.119315 Ukraine; IPC B61D 3/18 / Cabal I. Yu., Myamlin S. S., Bosyi D. O., Sablin O. I., Khomenko I. Yu.; Applicant and patent holder Dnepropetr. NAT. Univ well.d. Tr. they. AK. V. Lazaryan. - № U201701809; statement. 27.02.17; publ. 25.09.17, bul. No. 18. - 4 seconds.
28. The computer program "Automated system of decision-making on the allocation of excess energy recovery in the system of electric vehicles based on fuzzy logic": the Certificate of registration of copyright on work № 72577 / Sablin, O. I., Polovinko, S. G., Ivanov A. P.; Ukraine / Was 27.06.2017. – Kyiv : Ministry of economic development and trade, 27-06-2017.
29. Sablin O. Y. Criteria of efficiency of electric power consumption of electric transport. O. I. Sablin, V. V. Artemchuk // Energy Saving on railway transport: theses of the Doc. III international scientific practice. Conf. - Dnepropetrovsk, 2012. – P.70-71.
30. Sablin O. I. Intelligent technologies to improve the efficiency of energy recovery in the system of electric transport. O. I. Sablin, V. G. Kuznetsov // Materials of international scientific practice. Conf. "Modern problems of development of intelligent transport systems". - Dnepropetrovsk, 2014. - P. 116.
31. Sablin O. I. Current state of the problem of using electric power recovery in the system of electric transport / O. I. Sablin // "Energy Saving in railway transport and

- industry" : materials of the V international scientific practice. Conf. - Dnepropetrovsk, 2014. - P. 129.
32. Sablin O. I. optimal distribution of regenerative energy in the electric vehicle / O. I. Sablin, V. G. Kuznetsov // "TRANSELEKTRO-2014" : abstracts. VII international scientific practice. Conf. "Electrification of transport". - Dnepropetrovsk, 2014. - P. 51.
33. Sablin O. Assessment of Energy Saving Potential in the Subway by Means of Energy Regeneration / O. Sablin, V. Kuznetsov // III Miedzynarodowa Konferencja Naukowa "Najnowsze technologie w transporcie szynowym" (18.11.2014). - Warszawa, Jozefow. - P. 59.
34. Sablin O. I. Experimental study of the efficiency of electric power recovery in the conditions of the Dnepropetrovsk metro / O. I. Sablin, V. G. Kuznetsov, P. V. Gubsky // "Problems and prospects of railway transport development" : theses of the Doc. 75-th International scientific-practical. Conf. - Dnepropetrovsk, 2015. - P.122.
35. Sablin O. I. the problem of accounting for energy recovery on Railways / O. I. Sablin, V. G. Kuznetsov, A. A. Chernaya // "Energy Saving on railway transport and in industry": materials of the VI international scientific practice. Conf. - Volovets, 2015. - P. 73.
36. Sablin O. I. Analysis of efficiency of energy recovery in the suburban trains / A. I. Sablin, V. G. Kuznetsov, A. A. Chornaya // "Energy Saving in railway transport and industry" : proceedings of the VI international scientific-pract. Conf. - Volovets, 2015. - P. 74.
37. Sablin O. I. Efficiency of electric power recovery in the system of electric transport with inverter traction DC substations / O. I. Sablin, V. G. Kuznetsov M. A. Babyak // "Optimal control of electrical installations": theses of the Doc. III International science and technology. Conf. - Vinnitsa, 2015. - P. 11.
38. Sablin O. I. Distribution of excess energy recovery in the electric transport system using fuzzy control / O. I. Sablin, A. P. Ivanov, V. G. Kuznetsov // "Electrification

- of transport "TRANSELECTRO-2015": theses of the Doc. VII international scientific practice. Conf. - Odessa, 2015. - P. 74-76.
39. Ivanov A. P. Implementation of the decision-making system on the distribution of the recuperation energy of the electric locomotive on the basis of fuzzy logic / A. P. Ivanov, O. I. Sablin // "Modern information and communication technologies in transport, industry and education" : theses of IX international scientific practice. Conf. - Dnepropetrovsk, 2015. - P. 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. Improving the efficiency of energy recovery modes of electric transport by regulating the modes of traction power supply by means of fuzzy logic / O. I. Sablin // "Problems and prospects of development of railway transport": materials of the 76th International scientific practice. Conf. - Dnipro, 2016. - P. 83.
42. Sablin O. I. Regulation of voltage at the busbars of traction substations DC in the recovery mode with limited traction energy consumption at sites / O. I. Sablin, N. M. Pulin, V. G. Kuznetsov // "Energyoptimal technology of the transportation process" : abstracts. International scientific practice. Conf. - Morshyn, 2016. - P. 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. Sablin O. I. the Principle of intelligent control of the current distribution of recovery vehicles in the traction electric supply system / O. I. Sablin // "Energyoptimal technology of the transportation process" : abstracts. II International scientific practice. Conf. - Lviv, 2017. - P. 46.
45. Sablin O. I. Improvement of power supply systems of electrified transport to ensure rational conditions of energy recovery of vehicles / O. I. Sablin, V. G. Kuz-

- netsov // "Optimal control of electrical installations": theses of the Doc. IV International science and technology. Conf. - Vinnitsa, 2017. - P. 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. Sablin O. I. Choice of rational energy exchange modes of energy storage in traction systems power supply / O. I. Sablin, D. O. Bosyi // "Problems of transport security" : materials of the VIII International scientific-pract. Conf. - Gomel, 2017. - P. 145.

## ЗМІСТ

ЗМІСТ.....	22
Вступ .....	27
Розділ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ .....	39
1.1. Енергетика процесу рекуперації при електричному гальмуванні транспортних засобів .....	39
1.2. Аналіз факторів, що впливають на ефективність розподілу і використання енергії рекуперації.....	46
1.2.1. Вплив режиму напруги в тяговій мережі .....	48
1.2.2. Вплив конструкції та параметрів тягової мережі .....	60
1.2.3. Вплив параметрів руху на ділянках .....	62
1.2.4. Вплив експлуатаційних параметрів ділянок руху .....	69
1.2.5. Вплив рекуперації енергії на стан верхньої будови колії, динаміку поїздів та суміжні системи .....	71
1.3. Показники ефективності рекуперації енергії.....	75
1.4. Аналіз методів підвищення ефективності використання електроенергії рекуперації .....	80
1.5. Постановка проблеми. Обґрунтування мети і формулювання задач наукового дослідження.....	96
Розділ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ .....	98
2.1. Дослідження режимів напруги на струмоприймачах транспортних засобів та у тяговій мережі при рекуперації.....	98
2.2. Дослідження впливу режимів систем зовнішнього електропостачання на ефективність рекуперації на ділянках з інвертуючими ТП .....	113
2.3. Дослідження графіків потужності рекуперації в системах електричного транспорту постійного струму.....	121

	23
Висновки до розділу 2 .....	127
Розділ 3. МОДЕЛЮВАННЯ КВАЗІУСТАЛЕНИХ ПРОЦЕСІВ СТРУМОРОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО І ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....	129
3.1 Загальні підходи до моделювання режимів систем тягового електропостачання та їх мета.....	129
3.2. Модель ЕРС в режимі рекуперації енергії.....	133
3.3. Моделі елементів системи тягового електропостачання .....	139
3.4. Моделювання взаємодії ЕРС в режимі рекуперації з системою тягового електропостачання .....	154
3.5. Аналіз впливу рекуперативного гальмування на витрату електричної енергії за лічильниками тягових підстанцій.....	168
Висновки до розділу 3 .....	176
Розділ 4. РОЗВИТОК ПРИНЦИПІВ НЕЧІТКОГО УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ.....	178
4.1. Конструкційно-продукційне моделювання зони розподілу енергії рекуперації транспортних засобів .....	178
4.1.1. Спеціалізована конструктивно-продукційна модель зони рекуперації .....	181
4.1.2. Модель виконавця конструювання .....	183
4.1.3. Конкретизація конструктивно-продукційної моделі.....	184
4.1.4. Реалізація конкретної моделі зони рекуперації .....	187
4.2. Нечітке управління режимами систем тягового електропостачання при розподіленні надлишкової енергії рекуперації .....	192
4.2.1. Формулювання задачі раціонального розподілу надлишкової енергії рекуперації .....	193
4.2.2 Описання нечіткої моделі управління розподілом надлишкової енергії рекуперації .....	195
4.2.3. Реалізація нечіткого управління розподілом надлишкової енергії рекуперації .....	201

4.3. Принцип інтелектуального управління розподілом струму рекуперації транспортних засобів в системі тягового електропостачання.....	204
Висновки до розділу 4 .....	209
<b>Розділ 5. РОЗВИТОК МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ПРИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ.....</b>	
5.1. Визначення теоретичного потенціалу енергозбереження при рекуперації енергії .....	211
5.2. Експериментальна оцінка резервів енергозбереження при рекуперації електроенергії (на прикладі Дніпропетровського метрополітену) .....	219
5.3. Удосконалення системи обліку енергії рекуперації на залізницях постійного струму .....	228
Висновки до розділу 5 .....	237
<b>Розділ 6. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ПІДВИЩЕННЮ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ .</b>	
6.1. Оптимізація транспортного потоку з урахуванням використання енергії рекуперації .....	239
6.2. Вибір типу та параметрів накопичувача енергії для тягових підстанцій. Керування процесом заряду накопичувачів енергії .....	245
6.2.1. Варіанти розташування накопичувачів для електричної тяги .....	245
6.2.2. ...Вплив місця установки накопичувача на енергетичні показники СТЕ	247
6.2.3. Принцип вибору типу та потужності накопичувача для СТЕ.....	253
6.2.4. Принципи керування процесами енергообміну в накопичувачах ...	257
6.3. Ситуаційне регулювання напруги на шинах тягових підстанцій і в тяговій мережі при рекуперації електроенергії.....	262
6.4. Розробка технології сумісної роботи інверторів та накопичувачів при розподілі надлишкової енергії рекуперації .....	267
6.5. Техніко-економічна оцінка впровадження енергозберігаючих заходів з підвищення ефективності споживання енергії рекуперації.....	270
Висновки до розділу 6 .....	273



	25
Висновки .....	275
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	279
ДОДАТОК А .....	279
ДОДАТОК Б .....	333
ДОДАТОК В .....	350
ДОДАТОК Г .....	356

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

Скорочення, термін, позначення	Пояснення
ЕРС	Електрорухомий склад
СТЕ	Система тягового електропостачання
СЗЕ	Система зовнішнього електропостачання
МПЗ	Міжпідстанційна зона
ТП	Тягова підстанція
ККД	Коефіцієнт корисної дії
НЕ	Накопичувачі електроенергії
ГРП	Графік руху поїздів
ВП	Випрямно-інверторний перетворювач
РГ	Рекуперативне гальмування
СЕТ	Система електричної тяги
ТМ	Тягова мережа
РН	Регулятор напруги
КМ	Контактна мережа
ІА	Інверторний агрегат
ВА	Випрямний агрегат

## ВСТУП

**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 відновле-

ної 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., Омельяненко 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); «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» (№ ДР 0115U002311); «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем» в рамках конкурсу наукових проектів молодих вчених МОН України (№ ДР 0116U006982); «Вдосконалені інформаційні технології моделювання взаємодії рухомого складу та колії» в рамках конкурсу міжнародних україно-білоруських наукових проектів 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 та задачі дослідження.** 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 вводі 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 вираховуванням 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 ме-

тоди 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 тимчасово-

го 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 підстанції та співвідношення потужності електропоживання 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 електропоживання 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 викорис-

тання 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» ОКЕУ» (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 науково-практичних конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та 4-х додатків. Повний обсяг дисертації становить 364 сторінок, серед них 120 рисунків за текстом, з них 13 рисунки розташовано на 7 окремих сторінках, 39 таблиць за текстом, список використаних джерел із 301 найменування – на 36 сторінках, додатки – на 47 сторінках. Основний текст роботи викладено на 277 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

#### 1.1. Енергетика процесу рекуперації при електричному гальмуванні транспортних засобів

Рекуперація в системах електричного транспорту використовується для відновлення частини витраченої на тягу електроенергії в процесі зниження або обмеження швидкості транспортних засобів шляхом перетворення частини їх кінетичної або потенційної енергії в електричну енергію. При цьому в поїзді здійснюється процес рекуперативного гальмування, що представляє собою один з видів електричного гальмування, при якому тягові електродвигуни поїзда працюють в режимі генераторів з гальмівним моментом на валу і передають вироблену електроенергію в контактну мережу іншим споживачам.

Електроенергія, що споживається транспортним засобом з контактної мережі за час  $T$

$$W = \int_0^T U(t)I(t)dt \quad (1.1)$$

витрачається на здійснення тяговими електродвигунами механічної роботи для переміщення поїзда, живлення кіл власних потреб та покриття втрат енергії в силовому обладнанні. За час руху поїзда під струмом енергія що споживається іде на виконання роботи з подолання сил опору руху і накопичення кінетичної енергії, а при виході поїзда на вибіг рух продовжується за рахунок накопиченої кінетичної енергії, яка витрачається на подолання сил опору руху на шляху вибігу. Частина кінетичної енергії при відсутності рекуперативного гальмування перед зупинкою розсіюється в навколишнє середовище у вигляді тепла в механічних або реостатних гальмах.

В загальному випадку рівняння енергетичного балансу за час руху поїзда має наступний вигляд [1, 2]

$$W = W_{\Pi} + W_w + W_{\Gamma} + \Delta W + W_{\text{сн}} - W_{\text{рек}}, \quad (1.2)$$

де  $W_{\Pi}$  – втрати енергії в пускових пристроях поїзда,

$W_w$  – витрата енергії відповідно на подолання основного опору руху поїзда, опору в кривих і на ухилах,

$W_{\Gamma}$  – втрати енергії при гальмуванні поїзда,

$\Delta W$  – втрати енергії в силових колах поїзда,

$W_{\text{сн}}$  – витрата енергії на живлення кіл власних потреб,

$W_{\text{рек}}$  – енергія рекуперації.

При русі поїзда по спуску потенційна енергія поїзда що вивільняється перетворюється в роботу з подолання опору руху, в кінетичну енергію (при зростанні швидкості поїзда), і в теплову при пригальмовуванні і відсутності системи рекуперативного гальмування в поїзді. Кінетична енергія поїзда залежно від режиму руху може переходити в потенціальну, витрачатися на подолання опору руху або гаситися в гальмах для зупинки при відсутності рекуперації. Таким чином застосування рекуперативного гальмування на електропоїздах скорочує витрати електроенергії на тягу, що здійснюється за рахунок зниження втрат енергії в гальмах  $W_{\Gamma}$  шляхом перетворення частин потенційної і кінетичної енергій руху поїзда в електроенергію з поверненням її в контактну мережу. Енергія рекуперації  $W_{\text{рек}}$  реалізується на валах тягових електродвигунів, які працюють в генераторному режимі.

На сучасному ЕРС з плавним регулюванням потужності втрати  $W_{\Pi} \approx 0$ , а використання режиму рекуперативного гальмування дозволяє практично виключити з енергетичного балансу (1.2) складову втрат енергії в гальмах поїзда  $W_{\Gamma}$ , оскільки на такому рухомому складі існує можливість здійснення рекуперативного гальмування майже до зупинки транспортного засобу ( $W_{\text{рек}} \rightarrow W_{\Gamma}$ ).

Кількість електроенергії, яка може бути згенерована транспортним засобом при рекуперативному гальмуванні для зниження або обмеження швидкості,



визначається зменшенням його кінетичної і потенціальної енергії за вирахуванням роботи з подолання сил опору руху і дорівнює [1, 2]

$$W_{\text{рек}} = (0,01073(1 + \gamma)Q(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2) - 2,725Q(w_0 \pm i_{\text{екв}})S)\eta_{\text{рек}}, \quad (1.3)$$

де  $Q$  – вага поїзда,

$(1 + \gamma)$  – коефіцієнт інерції обертових мас поїзда,

$v_{\text{п}}, v_{\text{к}}$  – швидкість відповідно на початку і наприкінці гальмування,

$w_0$  – основне питомий опір руху поїзда при середній швидкості на ділянці гальмування,

$i_{\text{екв}}$  – еквівалентний ухил на ділянці гальмування,

$S$  – довжина гальмівного шляху,

$\eta_{\text{рек}}$  – ККД ЕРС в режимі рекуперації.

При гальмуваннях поїздів для зниження швидкості руху на прямих ділянках повна робота сил опору руху на ділянці гальмування значно менше зміни кінетичної енергії, тому (1.3) являє собою кінетичну енергію поїзда і може бути записано як

$$W_{\text{рек}} = W_{\text{кін}} = 0,01073(1 + \gamma)Q(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2)\eta_{\text{рек}}. \quad (1.4)$$

При пригальмовуванні поїзду для підтримки заданої швидкості руху (при  $v = \text{const}$ ) на ділянках з затяжними спусками кількість генерованої електроенергії визначається зміною потенційної енергії поїзда і дорівнює

$$W_{\text{рек}} = W_{\text{пот}} = 2,725Q(i_{\text{екв}} - w_0)S\eta_{\text{рек}}. \quad (1.5)$$

При використанні режимів рекуперативного гальмування в вантажному та пасажирському русі поїздів, де рекуперація використовується переважно для обмеження швидкості руху на ділянках зі спусками, енергозберігаючий ефект, за різними оцінками фахівців [1-8], може сягати 12...15 % від витрат на тягу. При використанні рекуперації на транспорті з циклічними режимами руху (приміські електропоїзда, міський електротранспорт, метрополітен), рівень від-

новлення витраченої на тягу енергії є значно більшим, і може сягати 30...40 %. Так, наприклад дослідження проведені для умов київського метрополітену в [3], дали змогу визначити максимальні значення енергії рекуперації при гальмуваннях. В роботі визначено, що на помірно прямих ділянках повернення енергії в мережу може сягати 60 % від витраченої енергії на тягу, а на ділянках зі спусками повернення може в 2...3 рази перевищувати спожиту на розгін поїзда енергію, що в середньому по мережі дає зниження витрат енергії на тягу на 40...44 %.

При застосуванні рекуперативного гальмування для зупинного гальмування важливим чинником, що визначає корисне використання кінетичної енергії транспортного засобу, є швидкість початку гальмування ЕРС. Рівень зниження витрати енергії на тягу при застосуванні рекуперації для зупинного гальмування міського електротранспорту може оцінюватися коефіцієнтом запасу кінетичної енергії [4], рівним відношенню кінетичної енергії, запасеної при русі ЕРС до витраченої енергії на розгін

$$k_3 = \frac{W_{\text{кін}}}{W} = \frac{0,01073(1 + \gamma)Q(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2)\eta_{\text{рек}}}{W}. \quad (1.6)$$

Значення величини  $k_3$  для різних швидкостей початку гальмування і відстаней між зупинками для тролейбусів наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнту запасу кінетичної енергії тролейбусів

Довжина гальмівного шляху, м	Значення коефіцієнту запасу кінетичної енергії пари різних швидкостях початку гальмування, км/год					
	20	30	40	50	60	70
200	0,338	0,531	0,674	0,761	–	–
250	0,296	0,480	0,626	0,737	0,836	–
300	0,254	0,431	0,578	0,713	0,755	–
350	0,231	0,394	0,548	0,661	0,729	0,839
400	0,210	0,359	0,519	0,610	0,703	0,760
450	0,191	0,321	0,480	0,582	0,688	0,731
500	0,178	0,295	0,454	0,564	0,652	0,712

З табл. 1.1 видно, що зі збільшенням швидкості початку гальмування частка кінетичної енергії в загальному енергетичному балансі електротранспорту зростає пропорційно квадрату швидкості і є дуже суттєвою. Аналогічно буде при зниженні опору руху або підвищенні ККД ЕРС, а також при зменшенні відстані між зупинками, що особливо важливо для зниження втрат в гальмах ЕРС з циклічним рухом (трамваї, тролейбуси, метрополітен, приміські електропоїзди).

У сучасних транспортних засобів з циклічними режимами руху спостерігається тенденція до зниження сили опору руху і збільшення ККД тягової передачі [1, 2, 6-8], а також неухильно підвищується швидкість їх руху. У силу цих обставин, при малих відстанях між зупинками, у транспортних засобів циклічного руху на створення роботи з подолання сил опору руху може витрачатися менше половини сумарної енергії тягового двигуна, а інша її частина переходить в кінетичну енергію з подальшим розсіюванням при гальмування.

Таким чином, сучасні транспортні засоби циклічного руху, що працюють на високих швидкостях, мають великий резерв кінетичної енергії, використання якої може дати значний економічний ефект. Кінетична енергія ЕРС може бути використана шляхом її рекуперації, тобто призначену для розсіювання енергію, шляхом відповідних перетворень можна повертати в систему тягового або зовнішнього електропостачання для здійснення корисної роботи.

Залежно від видів руху ЕРС і режимів їх гальмування, рекуперація енергії в СЕТ являє собою випадковий процес з різною тривалістю та частотою застосування. На рис. 1.1 для порівняння наведено експериментально одержані реалізації миттєвої потужності  $p(t)$  основних видів електротранспорту, з чого видно, що ЕРС в режимі рекуперативного гальмування представляє собою рухоме в просторі джерело нестабілізованої енергії. При цьому режим рекуперації на магістральному і міському електротранспорті істотно розрізняється за тривалістю і ступенем нерівномірності графіків генерованої потужності.

На ЕРС циклічного руху через коротких відстані між зупинками практично відсутні усталені режими електроспоживання, а рекуперація застосовується пе-

реважно з метою зупинного гальмування. Генерована при цьому електроенергія має короткочасний характер (рис. 1.1, б-г).

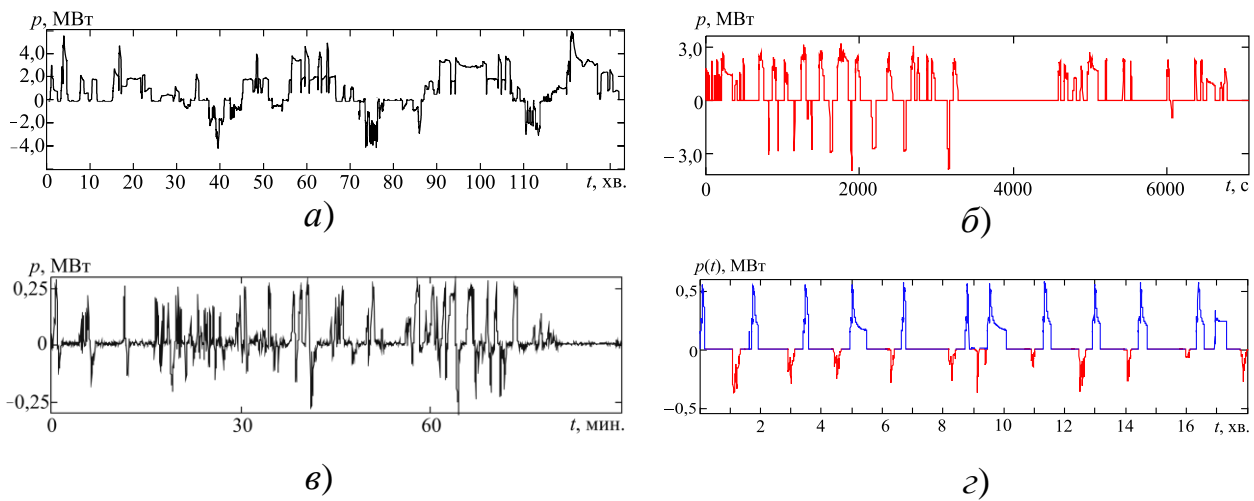


Рисунок 1.1 – Часові діаграми тягового електроживлення та рекуперації в різних видах руху транспортних засобів: вантажний електровоз постійного струму ВЛ11М (а), приміський електропоїзд ЕПЛ2Т (б), трамвай ТЗД (в) [29], електропоїзд метрополітену 81-717(714).5М (г) (рекуперація при  $p < 0$ )

На рис. 1.2 представлений спрощений процес електроживлення поїзду метрополітену з урахуванням режиму руху на ділянці з двома зупинними пунктами, що отриманий в результаті тягового розрахунку [7]. Тривалості окремих режимів руху поїзда (тяга, вибіг, рекуперація) і діапазон зміни потужностей (струмів) в режимах тяги і рекуперації являють собою випадкові величини, теоретичні розподіли яких наведено на рис. 1.3.

Відсутність строгих графіків руху в системах міського електротранспорту викликає високу нерівномірність режимів електроживлення та рекуперації, що можуть складати від кількох секунд до хвилин, тому режим рекуперації у цих видах руху є більш динамічним в порівнянні з приміським рухом та метрополітеном та має найбільш імпульсний характер. Особливо гостро це проявляється в тролейбусному русі, що володіє високою динамічністю внаслідок взаємодії з великою кількістю автотранспорту та зупинками на світлофорах.

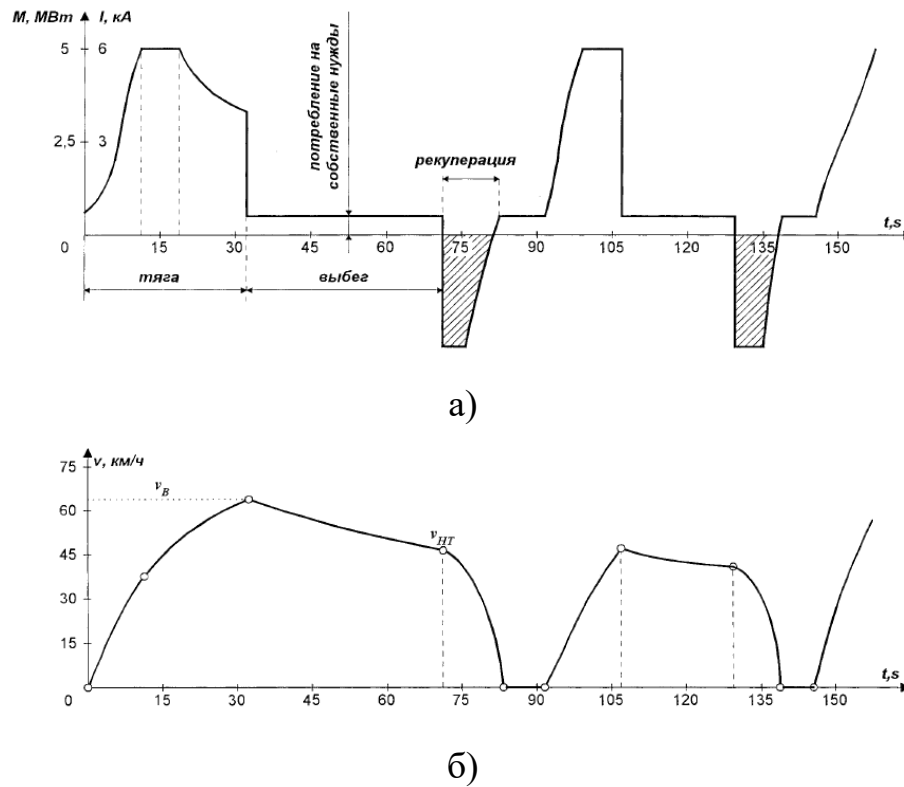


Рисунок 1.2 – Типова діаграма електроспоживання поїзду метрополітену (а) з урахуванням режиму (швидкості) руху (б)

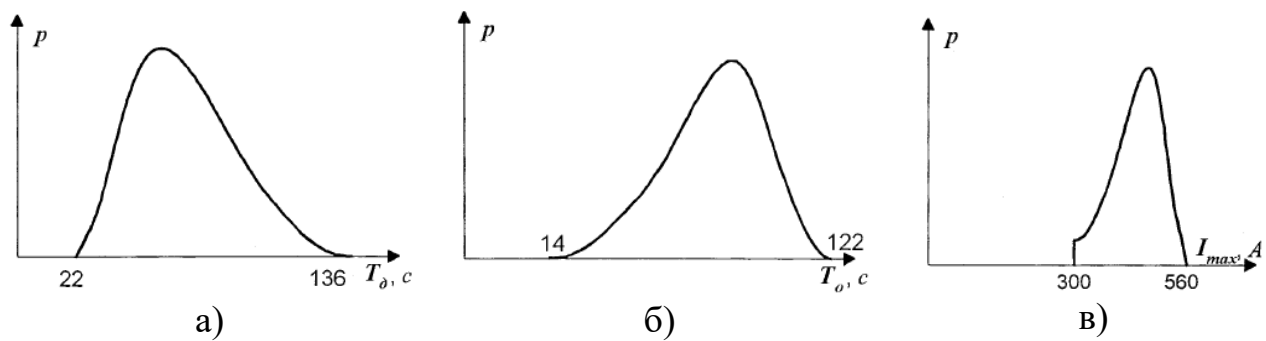


Рисунок 1.3 – Теоретичні розподіли тривалостей режимів тяги (а) і рекуперації (б) і величини тягового струму (в) електропоїздів метрополітену

В магістральному русі, де основний час займають усталені режими руху, рекуперативне гальмування застосовується в основному з метою обмеження швидкості на шкідливих спусках, тому рекуперація в цьому виді руху є найбільш стійкою, протікає більш тривало і рівномірно в часі. При підгальмовуванні поїздів на спусках, в залежності від їх довжини і швидкості руху режим рекупе-

рації у вантажних і пасажирських електровозів може тривати в середньому 2...8 хв. (рис. 1.1, а), а при зниженні швидкості руху перед ділянками з обмеженнями швидкості 0,5...2 хв.

Таким чином, ЕРС в режимі рекуперації являє собою джерело нестабілізованої енергії зі змінним та короткочасним графіком потужності, який залежить від багатьох, у тому числі випадкових факторів. Зважаючи на відмінності режимів електроспоживання та інтенсивності застосування режиму рекуперації в різних видах руху підходи до підвищення ефективності використання енергії рекуперації повинні враховувати розглянуті особливості.

## **1.2. Аналіз факторів, що впливають на ефективність розподілу і використання енергії рекуперації**

В умовах зростаючого енергодефіциту та постійного зростання тарифів на енергоресурси недовикористання такого важливого резерву енергозбереження в перевізному процесі як рекуперативне гальмування є неправомірним. Однак сьогодні можливості енергозбереження за рахунок рекуперації використовуються далеко не повністю. Останнім часом повернення електроенергії не перевищує 3 % від її споживання і щорічно знижується [5, 6, 8-13, 17-20]. Два минулих десятиріччя цей показник не досягав навіть 5 % по мережі залізниць.

На кількість електроенергії, що виробляється ЕРС при рекуперативному гальмуванні згідно з виразом (1.3) впливає ряд фіксованих параметрів. Крім цього в умовах реальної експлуатації на ефективність реалізації процесу рекуперації енергії опосередковано впливає ще ряд випадкових факторів, що не входять до (1.3). Найчастіше при рекуперативному гальмуванні транспортних засобів в мережу генерується енергія  $W'_{рек} < W_{рек}$ , а її нереалізована частина, що не може бути прийнята тяговою мережею за певних умов, є надлишковою енергією

$$W_{надл. рек} = W_{рек} - W'_{рек}, \quad (1.7)$$

що утилізується гальмівними пристроями транспортних засобів і знижує енергетичну ефективність системи електричної тяги.

Наявність складової  $W_{\text{надл рек}}$  пов'язана з відсутністю тягового електроживлення на ділянках в моменти рекуперації енергії, що особливо помітно при малих розмірах руху. Енергія  $W_{\text{надл рек}}$  в різних видах руху електротранспорту може сягати 30...100 % [9-11]. На рис. 1.4 приведено основні експлуатаційні фактори, що впливають на обсяги рекуперації енергії в системі електричної тяги, які є як детермінованими (задані або ті що можна корегувати), так і випадковими (некеровані або слабо керовані).

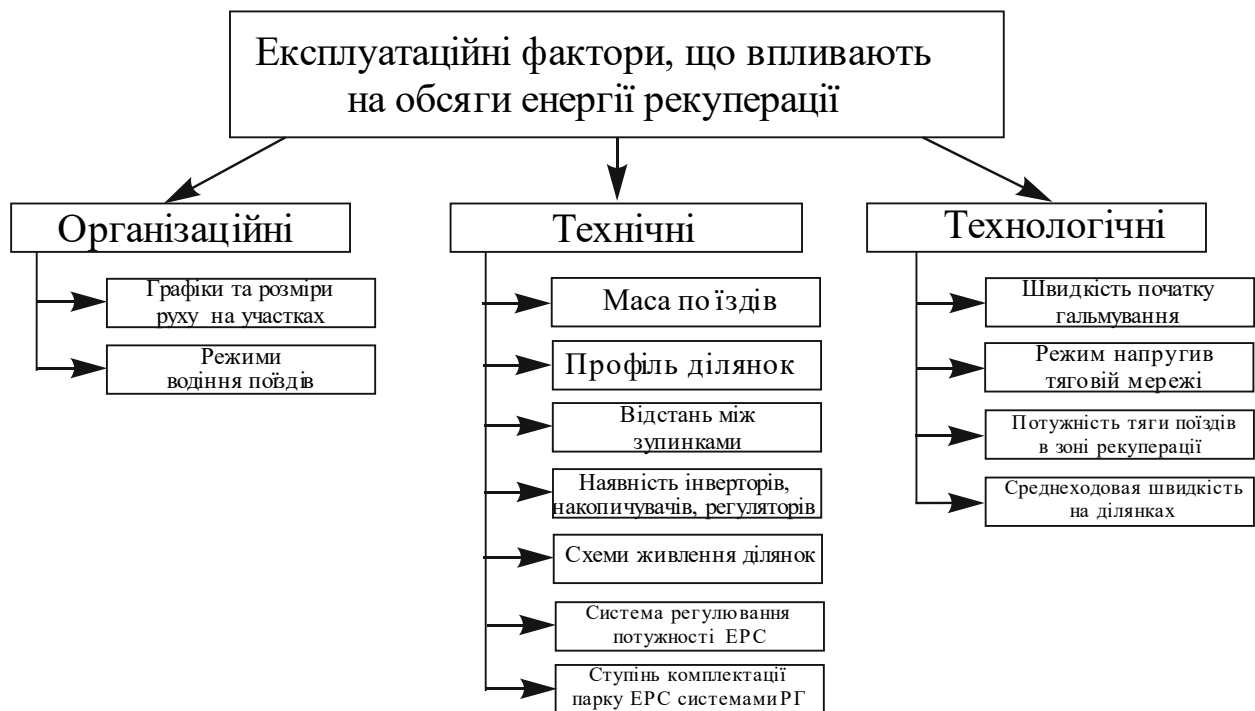


Рисунок 1.4 – Класифікація експлуатаційних факторів, що впливають на ефективність реалізації потенціалу рекуперації електроенергії

Також на ефективність рекуперації значно впливає технічна швидкість руху поїздів на ділянках обігу, оскільки швидкість закінчення ефективної рекуперації для ЕРС з контактною системою регулювання потужності знаходиться в діапазоні 10...15 км/год [1, 2, 6]. Наприклад в метрополітенах України середня

відстань між станціями становить близько 0,9...1,5 км, тому режими руху електропоїздів пов'язані з періодичним прискоренням і гальмуванням між зупинками. Данні режими руху, навіть при швидкостях початку гальмування 30...40 км/год, є сприятливими для використання рекуперації електроенергії перед зупинками, що дозволяє на 20...40 % зменшити споживання енергії на рух [30, 31]. При відсутності на рухомому складі системи рекуперативного гальмування вказана частка витраченої на тягу електроенергії буде втрачатися шляхом утилізації частини кінетичної і потенціальної енергії поїзда перед зупинкою в гальмівних пристроях (втрати в гальмах).

### 1.2.1. Вплив режиму напруги в тяговій мережі

Умовою переходу транспортного засобу при електричному гальмуванні в режим рекуперації є співвідношення

$$U_{\text{км}}(t) < U_{\text{с}}(t) < U_{\text{с}}^{\text{max}}, \quad (1.8)$$

де  $U_{\text{км}}(t)$ ,  $U_{\text{с}}(t)$ ,  $U_{\text{с}}^{\text{max}}$  – відповідно напруги в контактній мережі, на струмоприймачі рекуперуючого ЕРС і гранично допустима напруга на струмоприймачі (контактної мережі).

На різних типах рухомого складу виконання нижньої границі умови (1.8) для переходу в режим рекуперації реалізується відповідними методами регулювання напруги тягових електродвигунів в режимі електричного гальмування [1, 2, 14], що дозволяє отримувати напругу на струмоприймачі ЕРС на рівні  $U_{\text{с}}(t) > U_{\text{км}}(t)$ .

Виконання умови (1.8) забезпечує можливість протікання генераторного струму від ЕРС в тягову мережу:

$$I_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{с}}(t) - U_{\text{км}}(t)}{\sum R}, \quad (1.9)$$

де  $\sum R$  – еквівалентний опір контуру струму рекуперації.



При цьому режим рекуперації в системі електричної тяги викликає підвищення напруги в контактній мережі (рис. 1.5), що особливо проявляється в умовах обмеженого тягового електроспоживання в зоні рекуперації.

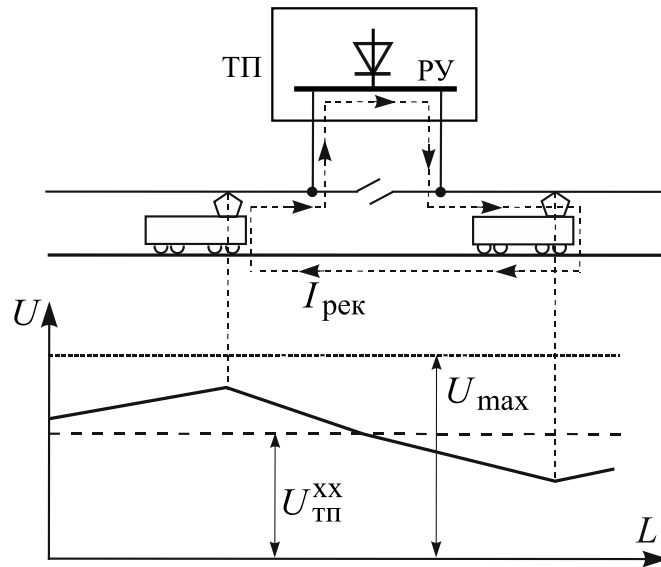


Рисунок 1.5 – Режим напруги в контактній мережі при наявності на ділянці рекуперації

При відсутності або зниженні тягового електроспоживання в зоні рекуперації відбувається зростання напруги на струмоприймачі рекуперативного поїзда, і по досягненні їм правої границі (1.8) рекуперація в мережу припиняється, а транспортний засіб переходить у режим реостатного або механічного гальмування, при якому енергія, що їм виробляється розсіюється в гальмівних пристроях. В наслідок цього на вантажонапружених ділянках з підвищеним на 10...15 % рівнем напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій має місце погіршення умов, а в деяких випадках неможливість рекуперації енергії по верхній межі умови (1.8).

Згідно ГОСТ 6962-75 та EN 50163-1996 [15, 16] при рекуперації повинна виконуватися права частина умови (1.8), а саме обмеження за максимально допустимою напругою на струмоприймачах ЕРС і шинах тягових підстанцій  $U^{\max}$ . При цьому для забезпечення надійного тягового електропостачання напруга на струмоприймачах різних систем електричної тяги, експлуатованих в Україні і країнах ЄС становить значення, що наведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Нормативні значення напруги на шинах ТП і струмоприймачах ЕРС різних систем електричної тяги

Вид електрифікованого транспорту	Напруга, кВ							
	На шинах ТП					На струмоприймачі ЕРС		
	$U_{\min 2}$	$U_{\min 1}$	$U_{\text{ном}}$	$U_{\max 1}$	$U_{\max 2}$	$U_{\min}$	$U_{\text{ном}}$	$U_{\max}$
Магістральні залізниці змінного струму	17,50	19,0 <sup>2)</sup>	25,0	27,5	29,0	19,0	25,0	29,0
Промислові залізниці змінного струму	—	—	10,5	11,5	—	7,5	10,0	11,5
Магістральні і промислові залізниці постійного струму	—	2,0 <sup>2)</sup>	3,3	3,60	3,9 <sup>1)</sup>	2,2	3,0	3,9 <sup>1)</sup>
Наземний міський електротранспорт (трамвай, тролейбус)	—	—	0,60	0,70	—	0,40	0,55	0,70 <sup>1)</sup>
Метрополітен	—	—	0,825	0,975	—	0,55	0,75	0,975 <sup>1)</sup>

В табл. 1.2 використанні такі позначення:  $U_{\min 2}$  та  $U_{\max 2}$  – відповідно мінімальна і максимальна нестабільні напруги з допустимою дією до  $t \leq 10$  хв.,  $U_{\min 1}$  і  $U_{\max 1}$  – відповідно мінімальна і максимальна стабільні напруги з необмеженою дією ( $t = \infty$ ),  $U_{\text{ном}}$ ,  $U_{\min}$ ,  $U_{\max}$  – відповідно номінальна, мінімальна і максимальні напруги тривалої дії.

Примітки:

1. В режимі рекуперації допускається підвищення напруги в контактній мережі до 4000 В для залізниць, 720 В для трамвайно-тролейбусних ліній і 1000 В для метрополітенів. Електрорухомий склад, що використовується в міжнародному сполученні, повинен витримувати цю напругу протягом короткого періоду часу – до 5 хв.
2. Для деяких країн цей норматив становить 2,4 кВ, 2,7 кВ, 2,9 кВ (постійний струм) і 19,0 кВ, 21,0 кВ, 24,0 кВ (змінний струм) відповідно на слабонавантажених, навантажених і швидкісних лініях.
3. Країни, для яких нормативи напруги відрізняються від наведених значень по стандарту EN 50163, повинні користуватися національними нормативами до приведення їх у відповідність зі стандартом EN 50163.

Дотримання даних обмежень на ЕРС при рекуперативному гальмуванні забезпечується відповідною системою захисту від максимальної напруги на струмоприймачі при рекуперації (реле максимальної напруги), що при досягненні граничного значення вимикає режим рекуперації і вмикає реостатне або механічне гальмування. Данні обмеження напруги знижують діапазон застосування рекуперації і потенціал енергозбереження, але пов'язані із забезпеченням надійності і безпеки функціонування силових кіл ЕРС на ділянках.

Виконання верхньої границі умови (1.8) при рекуперації напряму пов'язано з наявністю в зоні рекуперації поїздів в тяговому режимі. Тобто ре-

жим напруги на струмоприймачі  $U_c(t)$  рекуперативного поїзда повністю залежить від рівня тягового електроспоживання інших поїздів в зоні рекуперації та напруги холостого ходу на шинах ТП. Для більш докладного аналізу цієї залежності розглянемо структуру енергосистеми електричного транспорту з тяговими навантаженнями на міжпідстанційних зонах і взаємодіючих підсистеми (рис. 1.6).

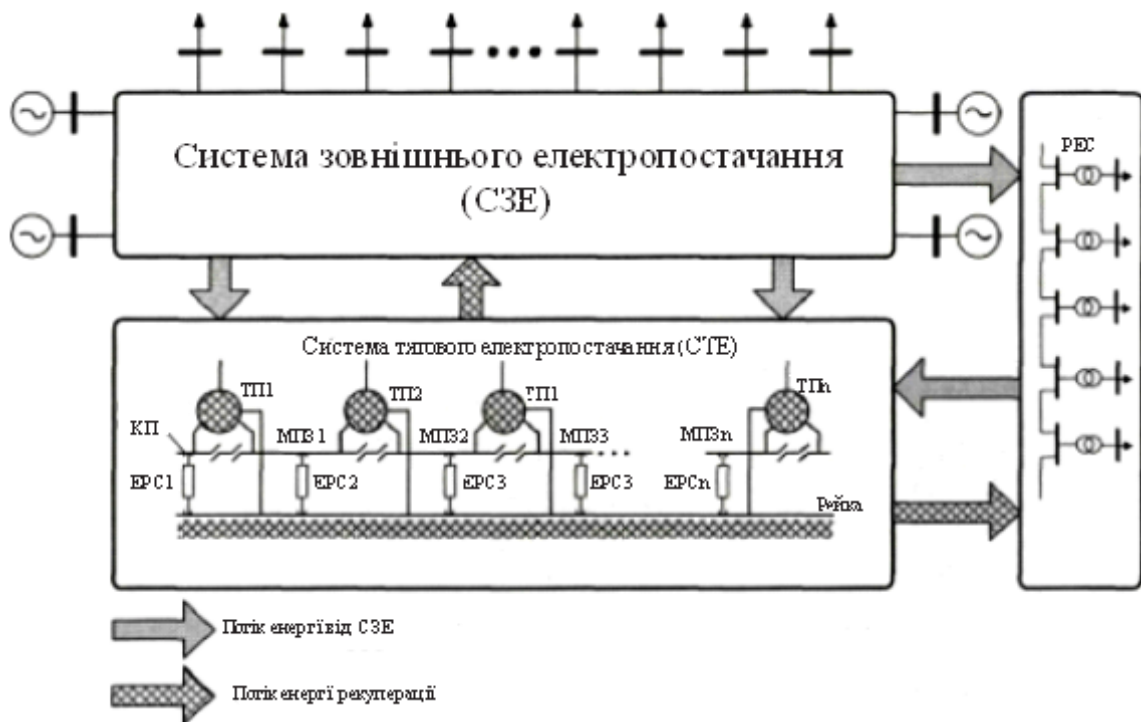


Рисунок 1.6. – Структурна схема взаємодії СТЕ і суміжних підсистем

Застосування рекуперативного гальмування на поїздах ускладнює режими роботи СТЕ, внаслідок значних генерованих потужностей при гальмуванні. У цьому випадку для здійснення рекуперативного гальмування необхідно виконати дві умови: мати низьку напругу на струмоприймачі рекуперативного ЕРС і приймач енергії рекуперації. У якості приймачів надлишкової енергії рекуперації в системі тяги постійного струму можуть служити потужні інверторні агрегати або накопичувачі на ТП.

Якщо, наприклад, на ділянці МПЗ 2 (рис. 1.6) знаходиться поїзд ЕРС 2 в режимі рекуперації і в його зоні рекуперації відсутні інші ЕРС в режимі тяги

(відповідно ТП не обладнані інверторами або, обладнані а СЗЕ в цей момент не здатна прийняти надлишкову енергію рекуперації), то на струмоприймачі ЕРС 2 і в тяговій мережі буде збільшуватися напруга. По досягненню гранично допустимого значення напруги на струмоприймачі рекуперативного ЕРС відбувається «зрив рекуперації» і передача енергії в контактну мережу припиняється, що особливо часто зустрічається на одноколійних електрифікованих ділянках і при малих розмірах руху.

Визначення оптимальної напруги в системі електропостачання при наявності рекуперативних поїздів є окремою прикладною задачею, яка повинна розв'язуватися з урахуванням впливу великої кількості факторів. При наявності на ділянках рекуперативних поїздів сумарні витрати в СТЕ будуть знижуватися за рахунок часткового відновлення спожитої енергії і створюваного підвищення напруги в тяговій мережі. Однак в СТЕ постійного струму при цьому можуть створюватися умови для живлення енергією рекуперації від електропоїздів, розташованих на інших міжпідстанційних зонах, внаслідок чого зростатимуть втрати енергії в системі електропостачання. Крім того, для забезпечення умов рекуперації необхідно знижувати напругу на тих шинах підстанцій, де будуть встановлені приймачі надлишкової енергії рекуперації, а отже, зменшувати напругу на струмоприймачах електровозів, які слідуєть на суміжних зонах у тяговому режимі.

Тому для оцінки напруги на шинах тягових підстанцій, що живлять ділянки, де одночасно можуть перебувати поїзда в тяговому і рекуперативному режимах, необхідно враховувати наступні умови: напруга на шинах підстанцій  $U_{ш}$  має бути не нижче напруги  $U_{m \tau}$ , необхідної для забезпечення заданих часів ходу, передбачених графіком руху, і не вище напруги  $U_{m p}$ , при якому енергія, вироблювана рекуперативними електропоїздами, буде дорівнює тій економії енергії, яку могли б дати електровози в тяговому режимі при цьому напрузі на шинах підстанції.

Отже, умовою вибору  $U_{ш}$  буде  $U_{m \tau} < U_{ш} < U_{m p}$  причому  $U_{ш} = U_{m \tau} + \Delta U_{\tau}$ . Тут  $U_{m \tau}$  – найменша середня напруга на струмоприймачах електровозів за час

ходу їх під струмом, що забезпечує задані часи ходу;  $\Delta U_T$  – середня втрата напруги в системі електропостачання за час ходу електровозів у тяговому режимі.

Необхідність забезпечення певної напруги при наявності рекуперативних поїздів стала актуальною не тільки для вантажних поїздів при експлуатації на ділянках з затяжними спусками, а і при впровадженні швидкісного руху на ділянках тяги постійного струму. Особливість режиму роботи цих електропоїздів полягає в тому, що при русі з високими швидкостями і великою кількістю зупинок вони значну частину часу йдуть без струму (на вибігу), невеликий час йдуть в тяговому режимі і якусь частину часу гальмування використовують для рекуперації енергії.

При проходженні великовагових поїздів і швидкісних поїздів навіть на двоколійних ділянках СТЕ постійного струму з ТП, що не обладнані інверторами, при відсутності поїздів у режимі тяги або низькому тяговому електроживанні на ділянці виникає підвищення рівня напруги, що приводить до зриву режиму рекуперації поїздів [17-22]. При цьому потенційна енергія гальмування поїздів при даних умовах є надлишковою, не може бути реалізована і втрачається в гальмівних реостатах. На рис. 1.7 наведено експериментальні залежності струму рекуперації електровоза ВЛ11М і напруги на шинах ближньої ТП, що отримано в [17], з чого видно, що при максимальному струмі рекуперативного гальмування електропоїзда 400 А напруга на шинах ТП перевищувала 4,4 кВ, а загальний час перевищення граничного напруги на шинах ТП склало близько 2,5 хв. при тривалості режиму рекуперації поїзда  $\sim 3$  хв.

Причиною такого режиму рекуперації з перевищенням напруги на шинах ТП і певних відрізках контактної мережі є з одного боку відсутність на МПЗ поїздів у режимі тяги (або їх недостатнє тягове навантаження у порівнянні з потужністю рекуперації), а з іншого боку можлива неправильна настройка системи рекуперації електровозу, яка не відключила режим рекуперації при  $U_c > 4,0$  кВ. При відсутності поїздів на МПЗ коло струму рекуперації цього ЕРС замикається через віддалені тягові навантаження, що знаходяться на суміжних МПЗ.

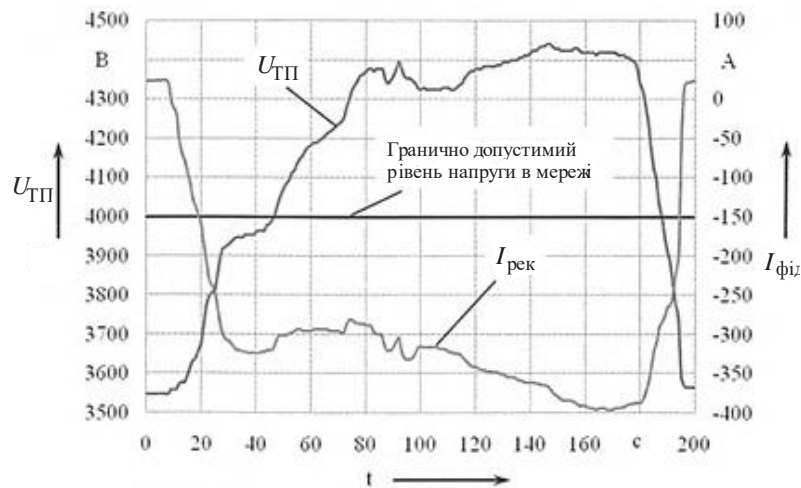


Рисунок 1.7 – Графік зміни струму рекуперації електровоза ВЛ11М і напруги на шинах ближньої ТП при відсутності тягового навантаження

Якщо поїзда обладнані системою рекуперативно-реостатного гальмування, то при неможливості повної реалізації рекуперації енергії в мережу по верхній границі обмеження (1.8) електричне гальмування зберігається за рахунок підключення паралельної вітки резервного реостатного гальмування з збереженням кола рекуперації, але енергія, що генерується тяговими електродвигунами при гальмуванні поїзда розподіляється на гальмівні реостати та в контактну мережу.

Приклад раціонального використання енергії рекуперативного гальмування вантажного електровозу ВЛ10 приміським електропоїздом ЕР2Т, що йде по суміжній міжпідстанційній зоні в режимі тяги, приведений на рис. 1.8 [17].

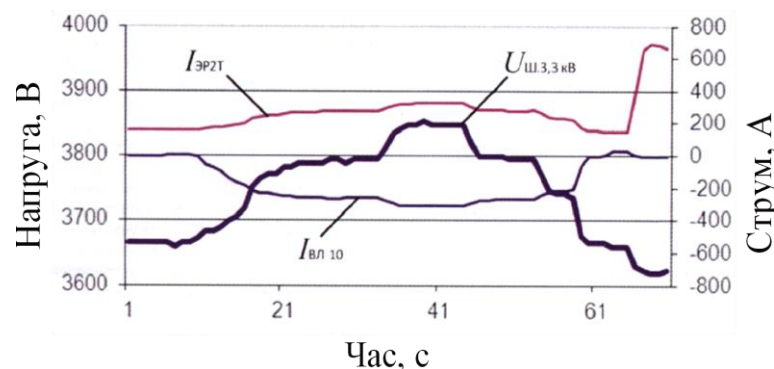


Рисунок 1.8 – Графік зміни струму рекуперації електровоза ВЛ10, напруги на шинах ближньої ТП і тягового струму електропоїзда ЕР2Т

Тривалість режиму рекуперації склала 49 с, максимальне значення струму рекуперації досягло 310 А. За наявності потягу EP2T, що знаходився на суміжній міжпідстанційній зоні і йде в режимі тяги із струмом 200 А, максимальна напруга на шинах тягової підстанції не перевищила 3850 В, що свідчить про раціональне використання енергії рекуперативного гальмування.

Виходячи з вищевикладеного, стає очевидним, що ефективність застосування рекуперативного гальмування багато в чому залежить від рівня напруги в контактній мережі, і чим воно нижче, тим простіше і ефективніше рекуперація. Проте можливість пониження напруги в контактній мережі обмежена необхідністю забезпечення пропускної спроможності. Як правило відповідно до діючої методики її розрахунку по облаштуваннях електропостачання на шинах підстанцій задається напруга, рівна 3600 В. Зниження напруги в контактній мережі дозволить збільшити дальність передачі енергії рекуперації від рекуперуючого локомотиву до потягів, що йдуть в режимі тяги.

В роботі [17] було виконано аналіз напруги і струмів в контактній мережі при застосуванні рекуперативного гальмування з використанням нових технічних засобів реєстрації струмів і напруги по фідерах контактної мережі, для двох сусідніх тягових підстанцій. При включенні пристрою безконтактного автоматичного регулювання напруги (БАРН) в тяговій мережі під навантаженням ТП розмах коливань напруги на шинах ТП скорочувався з 700 В (без БАРН) до 400 В (на період вмикання БАРН). Незважаючи на роботу пристроїв БАРН, при застосуванні рекуперативного гальмування напругу на шинах тягових підстанцій не вдається стабілізувати навіть при наявності тягового навантаження на шинах ТП.

Досвід експлуатації показує, що при проходженні великовагових поїздів на двоколійних ділянках відсутність інверторів на тягових підстанціях викликає підвищення рівня напруги в контактній мережі і призводить до зриву графіків руху поїздів [17-24]. Проблема з підвищенням напруги при рекуперації на перший погляд знімається при наявності інверторів на тягових підстанціях постійного струму. Безумовно, цей захід є дуже витратним. Оцінка ефективності їх

впровадження може бути проведена лише шляхом моделювання. При цьому необхідно враховувати ряд факторів, серед яких профіль колії, вага, кількість поїздів, стан системи тягового електропостачання та графік руху поїздів.

Для порівняння режимів роботи системи тягового електропостачання як при відсутності використання рекуперативного гальмування і інверторів на тягових підстанціях, так і при їх наявності, випадковому або керованому процесі прийому надлишкової енергії рекуперації на міжпідстанційних зонах поїздами, що прямують у режимі тяги необхідне виконання імітаційного моделювання роботи зазначеної системи на ділянках з конкретними параметрами. В даному дослідженні потрібно виконати порівняння енергетичних показників роботи дільниці при наступних варіантах:

- без застосування рекуперативного гальмування на ЕРС;
- із застосуванням рекуперативного гальмування без установки інверторів на тягових підстанціях постійного струму і при випадковому процесі споживання енергії рекуперації поїздами, що слідує на ділянці у режимі тяги;
- із застосуванням рекуперативного гальмування і установкою інверторів на тягових підстанціях (на всіх і вибірково) і при випадковому процесі споживання енергії рекуперації поїздами, що слідує у режимі тяги;
- із застосуванням рекуперативного гальмування, відсутністю інверторів на тягових підстанціях і при керованому процесі прийому енергії рекуперації поїздами, що перебувають в режимі тяги.

Для діючих на ділянці розмірів руху та добової тоно-кілометрової роботи за результатами розрахунків в роботах [17, 24] отримано, що для варіанту без застосування рекуперативного гальмування питома витрата електроенергії за лічильниками ЕРС склала  $89,8 \text{ кВт}\cdot\text{год}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$  брутто, а за лічильниками тягових підстанцій питома витрата у цьому випадку склала  $96,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/10^4 \text{ т}\cdot\text{км}$  брутто.

Абсолютне значення рекуперації при цьому склало 10,1 % від витрат електроенергії на тягу по лічильникам електрорухомого складу Абсолютна величина енергії рекуперації в загальному випадку розподіляється наступним чином:



- частково споживається поїздами, що йдуть в режимі тяги;
- частково повертається в систему зовнішнього електропостачання (у разі наявності інверторів на тягових підстанціях);
- певна частка абсолютної енергії рекуперації залишається нереалізованою та утилізується гальмівними пристроями поїздів.

При відсутності приймачів надлишкової енергії рекуперації на завантажених ділянках може бути реалізовано 80,7 % абсолютної енергії рекуперації, частка нереалізованої енергії складає 19,3 %. Питома витрата електроенергії за лічильниками тягових підстанцій при відсутності випрямно-інверторного перетворювача (ВІП) складе 86,3 кВт·год/10<sup>4</sup> т·км брутто.

При ідеалізованому варіанті з ВІП на всіх тягових підстанціях розрахункової ділянки можливо реалізувати 86,5 % абсолютної енергії рекуперації, в тому числі 12,5 % може бути повернуто інверторами в систему зовнішнього електропостачання. Питома витрата електроенергії за лічильниками тягових підстанцій в цьому випадку складе 85,7 кВт·год/10<sup>4</sup> т·км брутто.

Максимальна переробка енергії інверторами може відноситися лише до деяких тягових підстанцій. У разі встановлення ВІП тільки на цих тягових підстанціях можливо реалізувати 84,1 % абсолютної енергії рекуперації, з них 7, % складе повернення з ВІП в систему зовнішнього електропостачання. Питома витрата електроенергії за лічильниками тягових підстанцій у разі встановлення ВІП на трьох тягових підстанціях складе 85,9 кВт·год/10<sup>4</sup> т·км брутто.

На рис. 1.9 наведено питомі витрати електричної енергії на тягу поїздів за лічильниками тягових підстанцій для прийнятих варіантів розрахунків, що отримані в роботах [24-27].

Представлені дані показують очевидну перевагу застосування рекуперативного гальмування, а також ефективність використання управління процесом споживання енергії рекуперації поїздами, що слідує у режимі тяги. При встановлених характеристиках об'єкта дослідження та управлінні процесом споживання енергії рекуперації поїздами, що перебувають у режимі тяги, економія електричної енергії досягає 12,1 %.

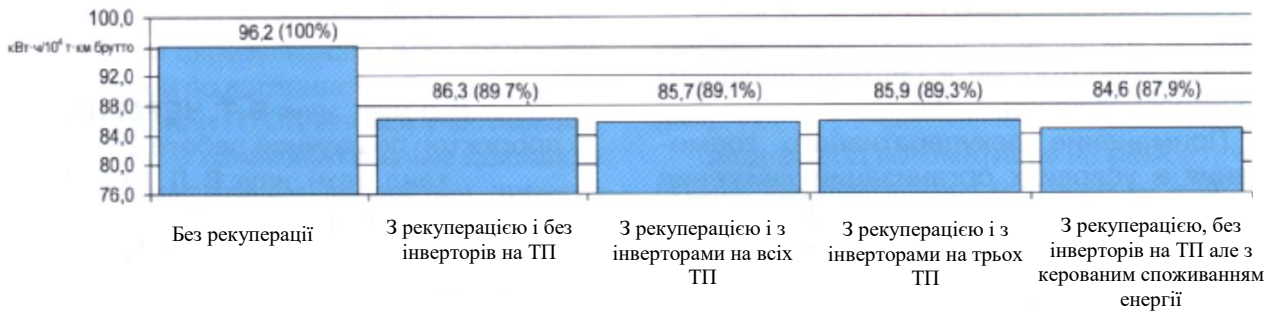


Рисунок 1.9 – Питома витрата електроенергії за лічильниками ТП для обраних варіантів розрахунків

У разі неможливості організації перевізного процесу з управлінням прийому енергії рекуперації поїздами, що слідують у режимі тяги, високу енергетичну ефективність показує використання на тягових підстанціях інверторних перетворювачів. Розрахунковий ефект при цьому може досягти 10,7 %.

На рис. 1.10 представлені значення втрат електроенергії в ТМ при різних вищезазначених варіантах. В розрахунках без застосування рекуперативного гальмування отримані найменші значення технологічних втрат у контактній мережі, які склали 6,59 % від витрат електроенергії за лічильниками ТП. Найбільші втрати в ній спостерігаються при застосуванні рекуперативного гальмування без використання інверторів на тягових підстанціях. Вони склали 7,55 % від витрат електроенергії за лічильниками тягових підстанцій.

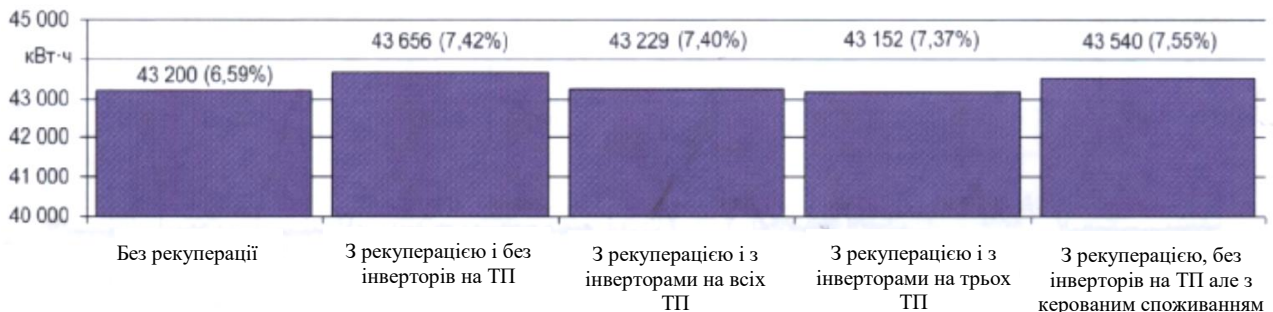


Рисунок 1.10 – Втрати електроенергії в контактній мережі для обраних варіантів розрахунку

Значення питомої рекуперації електроенергії за лічильниками електрорухомого складу при різних варіантах розрахунків наведено на рис. 1.9. Діаграми розподілу абсолютної рекуперації енергії для різних варіантів розрахунків представлені на рис. 1.10.

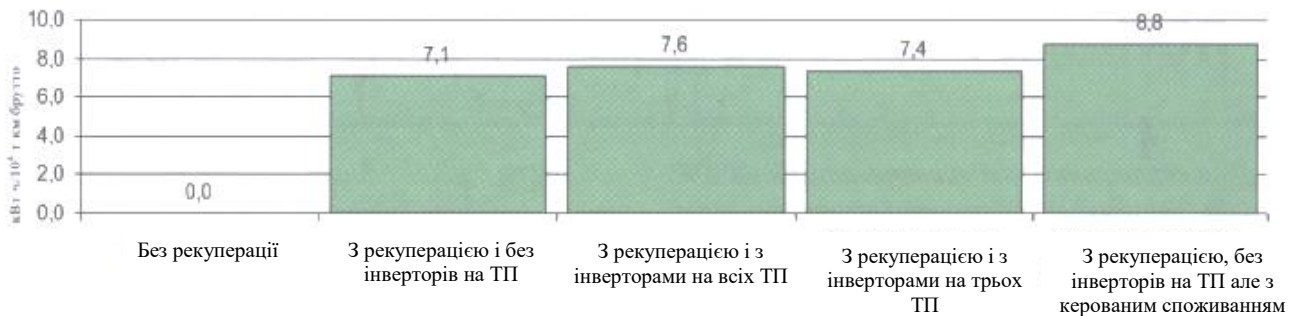


Рисунок 1.9 – Значення питомої рекуперації електроенергії для обраних варіантів розрахунку

На рис. 1.10 (а) представлений баланс розподілу енергії рекуперації для випадку без застосування ВІП на тягових підстанціях, (а) – з інверторами на всіх тягових підстанціях, (б) – з інверторами на трьох тягових підстанціях. Нереалізована енергія рекуперації позначена значком  $W_{рн}$ , енергія рекуперації, спожита поїздами в режимі тяги –  $W_{рп}$ ; енергія рекуперації, передана інверторами в систему зовнішнього електропостачання –  $W_{и}$ .

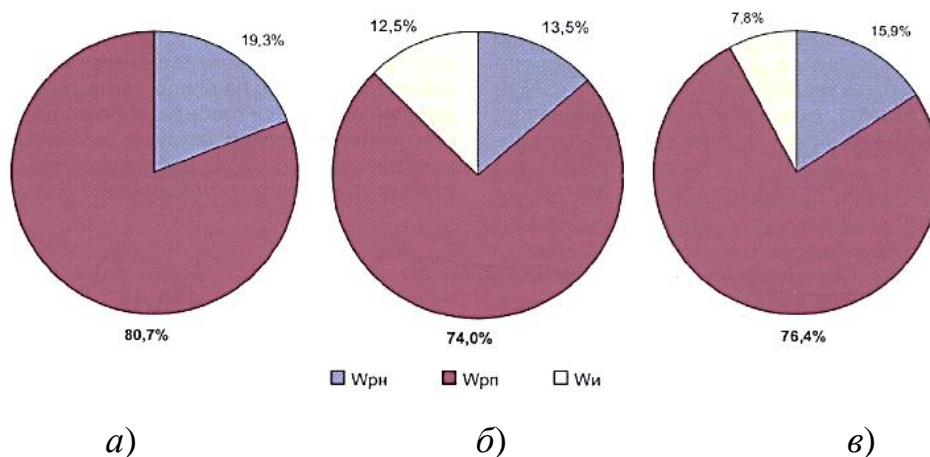


Рисунок 1.10 – Баланс енергії рекуперації на розрахунковій ділянці

Застосування рекуперативного гальмування в умовах організації руху поїздів навіть без додаткових приймачів надлишкової енергії рекуперації дозволяє скоротити питому витрату електроенергії за лічильниками тягових підстанцій на 10,3 %, з інверторами, встановленими на ділянках з горбистим профілем – на 10,7% [17, 24-27].

У разі реалізації всієї можливої енергії рекуперації на розрахунковій ділянці питома витрата енергії за лічильниками тягових підстанцій може бути скорочений на 12,1 % порівняно з випадком без застосування рекуперативного гальмування.

Таким чином, данні результати свідчать про незаперечну перевагу варіанту з управлінням процесами споживання енергії рекуперації поїздами, що рухаються у режимі тяги. У разі неможливості такої організації руху поїздів перевагу має режим із застосуванням інверторів, що встановлюються на тягових підстанціях з холмистим профілем шляху.

### **1.2.2. Вплив конструкції та параметрів тягової мережі**

Значний вплив на величину (1.7) і ефективність споживання енергії рекуперації на ділянках здійснює схема живлення ТМ, яка вибирається за критеріями надійності та економічності електропостачання. Основний вплив параметрів тягової мережі полягає у внесенні нею додаткового опору генераторному струму та підвищенні напруги на струмоприймачі рекуперативного транспортного засобу.

У СТЕ магістрального залізничного транспорту і метрополітенах на двоколіїних ділянках застосовуються роздільна, вузлова, паралельна, зустрічно-консольна, зустрічно-кільцева схеми живлення (рис. 1.11), а на одноколіїних – роздільні, консольні і зустрічно-консольні схеми.

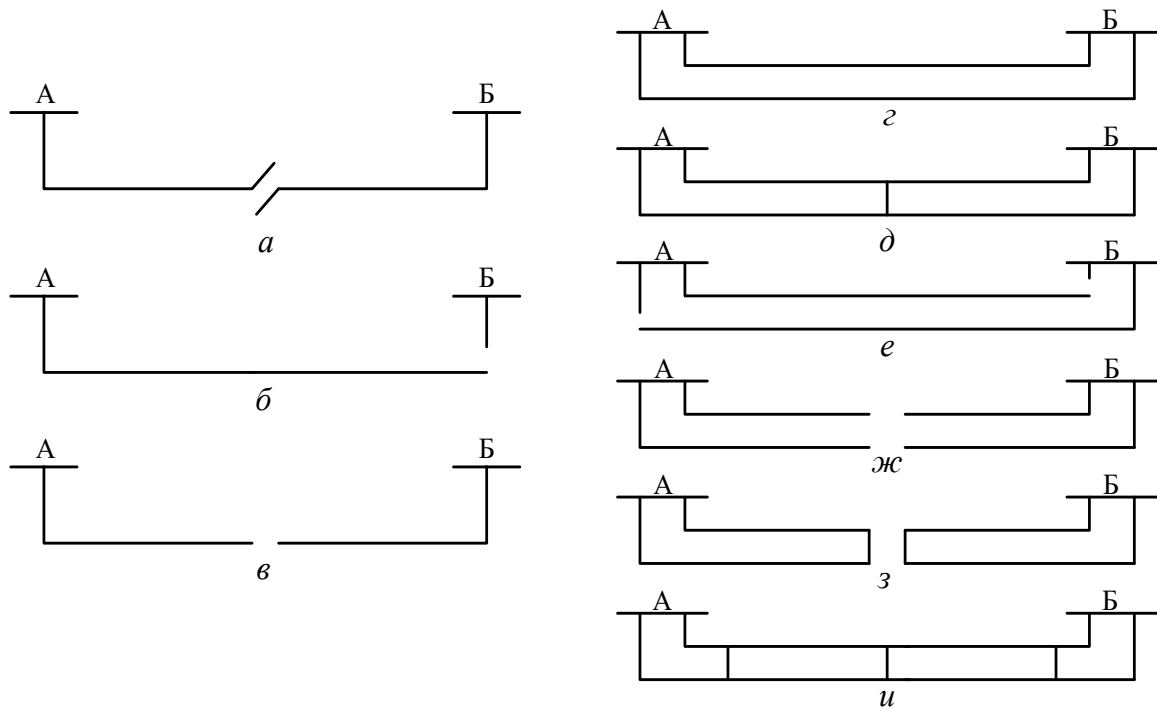


Рисунок 1.11 – Схеми живлення КС одноколіїної (а – роздільна, б – консольна, в – зустрічно-консольна) і двоколіїної (г – роздільна, д – вузлова, е – консольна, ж – зустрічно-консольна, з – зустрічно-кільцева, і – паралельна) ділянок

В системах міського електротранспорту використовується централізована система тягового електропостачання з одностороннім живленням контактної мережі (рис. 1.12), що секціонована на ділянки.

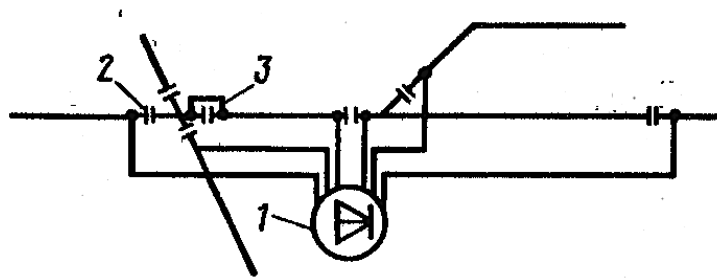


Рисунок 1.12 – Схема живлення міського електротранспорту:

1 – ТП, 2 – секційний ізолятор, 3 – електричний з'єднувач

З точки зору розподілу енергії рекуперації це є нераціонально, оскільки значний опір тягової мережі при цьому призводить до збільшення втрат енергії

рекуперації при її перетоках на сусідні секції контактної мережі через шини ТП і погіршення умов рекуперації, але дана конструкція є необхідною за умовами забезпечення необхідного рівня селективності систем захисту тягової мережі у аварійних режимах.

Найбільш несприятливі умови рекуперації мають місце на одноколійних ділянках з консольної схемою живлення [20, 21, 22, 28]. На двоколійних електрифікованих ділянках в Україні найбільш поширеною є паралельна схема живлення КМ. Поперечні з'єднання проводів КМ, що використовуються на двоколійних ділянках, дозволяють вирівнювати тягове навантаження на КМ, що призводить до зниження втрат електроенергії в ній і зменшення потрібного перерізу проводів. Для режиму рекуперації поперечні з'єднання покращують умови рекуперації та зменшують її втрати, оскільки зменшується відстань передачі і зростає імовірність споживання енергії рухомим складом, що рухається у режимі тяги по зустрічній колії, тому на двоколійних ділянках зі значними ухилами поперечні з'єднання обов'язкові. З'єднання проводів КС двоколійної ділянки в середині при незмінному перерізі проводів зменшує втрати енергії на 11...15 %, а якщо поперечні з'єднання розташовані рівномірно по довжині фідерної зони в трьох точках, то зниження втрат становить 21...24 % в порівнянні з КМ без перемичок. Подальше збільшення числа поперечних з'єднань малоефективне [28].

### **1.2.3. Вплив параметрів руху на ділянках**

Суттєвого впливу на ефективність рекуперації здійснюють режими, розміри та графіки руху поїздів, які оказують значний вплив на використання рекуперативної енергії, що повертається в тягову мережу при електричному гальмуванні поїздів. Суть цієї проблеми пов'язана з тим, що існуюча система тягового електропостачання побудована за децентралізованим принципом. Так, наприклад, у метрополітенах тягові підстанції розташовуються на кожній станції (рис. 1.13) [8, 30]. При цьому споживання енергії кожним поїздом в режимі роз-

гону та повернення енергії рекуперації в тягову мережу при гальмуванні поїздів характеризується чергуванням імпульсів споживання струму  $I_d$  і імпульсів повернення струму  $I_T$  (рис. 1.14, а).

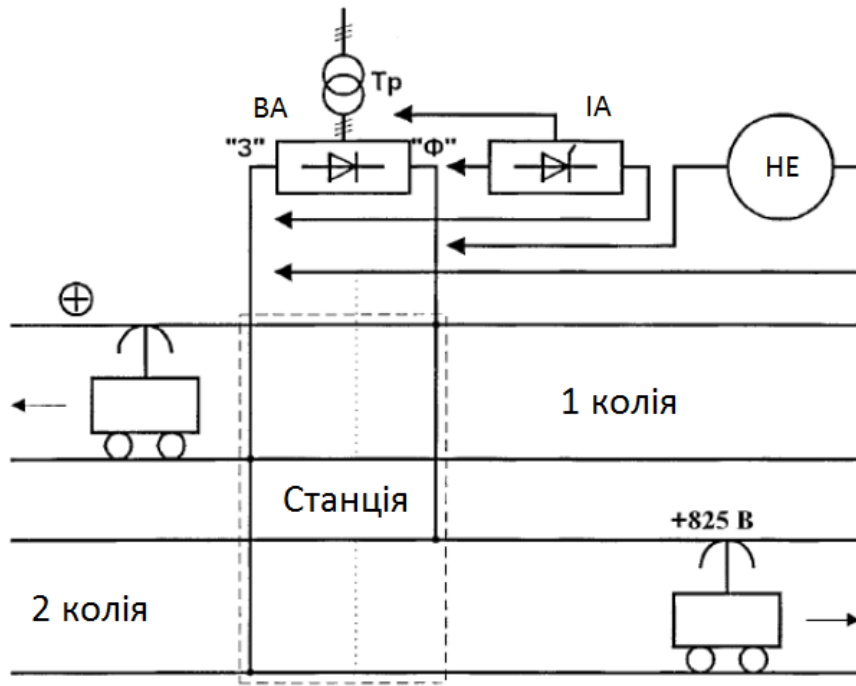


Рисунок 1.13 – Структурна схема живлення ділянки тягової мережі

Оскільки моменти підходу поїздів до станції по парній і непарній коліях є взаємно неузгодженими, то можна вважати ці підходи незалежними випадковими подіями. Ефективність потенціалу рекуперації при цьому можна охарактеризувати коефіцієнтом споживання енергії рекуперації  $k_{СП}$ , що визначається синхронізацією (збігом в часі) процесів споживання і рекуперації електроенергії двох поїздів в межах станції.

В найбільш сприятливому випадку відправлення зі станції одного поїзда (пуск) супроводжується прибуттям (рекуперативним гальмуванням) іншого (рис. 1.14, б), так що вся рекуперативна енергія від гальмуючого поїзда віддається в тягову мережу і споживається іншим поїздом в режимі розгону. В такому разі маємо абсолютну синхронізацію процесів споживання і рекуперації електроенергії ( $k_{СП} = 1$ ). В самому несприятливому випадку, коли обидва потя-

ги прибувають на станцію з парного і непарного напрямків одночасно і потім одночасно відправляються, має місце накладення однойменних піків споживання-віддачі енергії (рис. 1.14, в) при яких буде мати місце  $k_{СП} = 0$ .

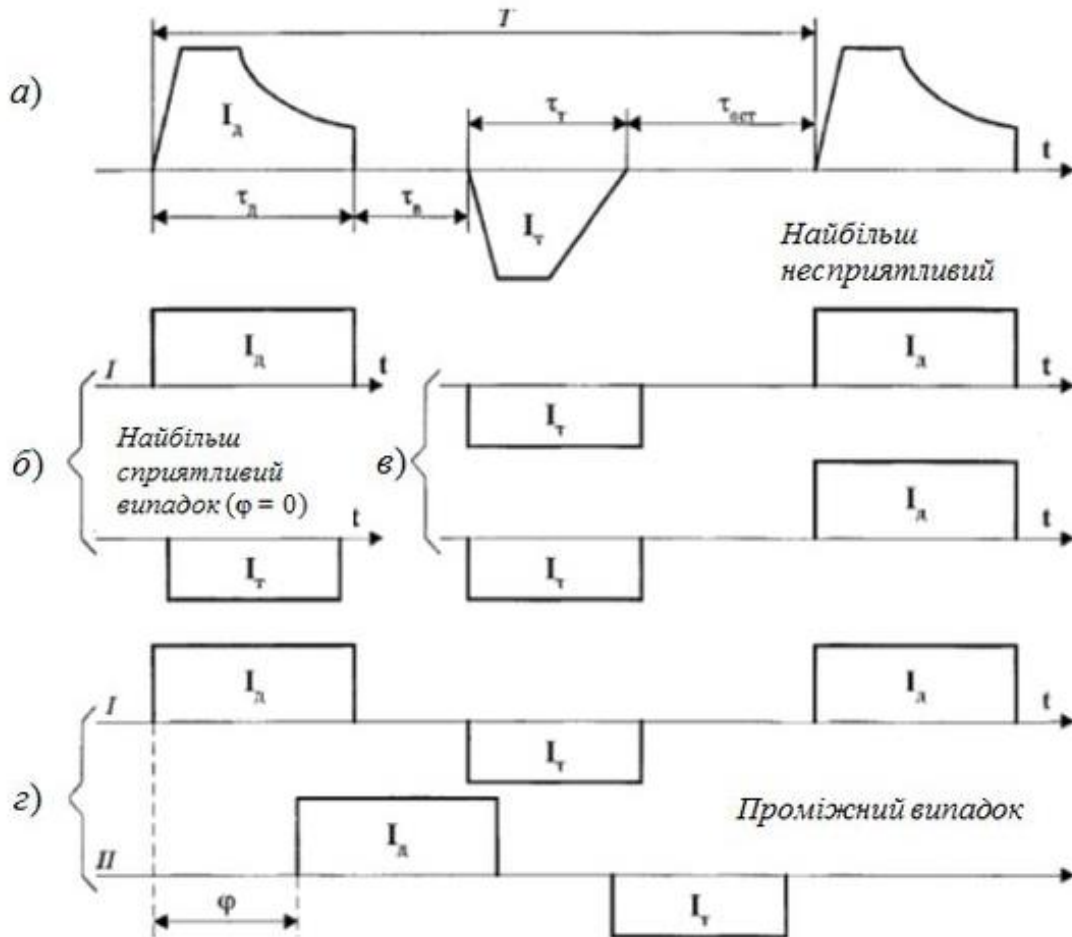


Рисунок 1.14 – Аналіз варіантів синхронізації процесів споживання і рекуперації електроенергії поїздами в межах станції

Однак найбільш ймовірний режим зображено на рис. 1.14, з, коли імпульси споживання-віддачі зсунуті один відносно одного на величину  $\varphi$ , при якому  $0 < k_{СП} < 1$ . Основна проблема при цьому пов'язана з використанням надлишкової енергії рекуперації  $W_{\text{надл рек}}$ , причому можливі варіанти відповідних рішень (рис. 1.13). Одним з таких варіантів є передача невикористаної на тягу енергії



$W_{\text{надл рек}}$  до системи зовнішнього електропостачання, для чого необхідна установка на тяговий підстанціях інверторних агрегатів ІА.

Іншим варіантом є локальна буферизація енергії  $W_{\text{надл рек}}$  в системі тягового електропостачання шляхом застосування накопичувачів енергії НЕ, які можуть забезпечити режим рекуперації енергії необмеженої тяговим електроспоживанням поїздів в зоні рекуперації, тобто можуть забезпечувати режим з  $k_{\text{СП}} = 1$ .

Синхронізація режимів електроспоживання і рекуперації в метрополітені може бути досягнута шляхом оптимізації графіків руху електропоїздів. Для повного використання рекуперативної енергії електропоїздами на тягу в системі метрополітену графіки руху поїздів повинні передбачати одночасне прибуття і відправлення електропоїздів на всі станції, при яких забезпечується  $\varphi = 0$  та  $k_{\text{СП}} = 1$ . Але при суттєвих різницях відстаней між станціями побудова таких графіків буде вимагати нерівномірну швидкість руху по перегонам, що призведе до зростання питомої витрати енергії на рух.

Імовірність знаходження поїзда в режимі тяги або рекуперації визначається відношенням до часу ходу  $t_x$  по перегонах відповідної тривалості тяги  $t_T$  і рекуперації  $t_p$ . При використанні аналітичних методів дослідження в роботі [31] отримано значення кількості поїздів, при якому ймовірність збігу режимів тяги і рекуперації близька до одиниці.

Для визначення числа поїздів  $n$ , при якому ймовірність збігу режимів тяги (Т) і рекуперації (Р) в межах зони рекуперації близька до одиниці треба поперше визначити ймовірності перебування поїздів на ділянці в тім чи іншому режимі роботи.

Імовірність знаходження поїзда в режимі тяги або рекуперації визначається ставленням до часу ходу  $t_x$  по перегонах відповідних тривалостей  $t_T$  і  $t_p$  перебування в цих режимах [31]:

$$P(\text{Т}) = t_T / t_x, \quad (1.10)$$

$$P(\text{Р}) = t_p / t_x. \quad (1.11)$$

Імовірність появи режимів відповідно тяги і рекуперації, беручи до уваги, що інтервали  $t_x$  по перегонах,  $t_T$  і  $t_p$  у цих режимах різні так, що  $t_T \gg t_p$ , дорівнює

$$P(T) = \frac{\sum_{i=1}^k t_{Ti}}{\sum_{i=1}^k t_{xi}}, \quad (1.12)$$

$$P(p) = \frac{\sum_{i=1}^k t_{pi}}{\sum_{i=1}^k t_{xi}}. \quad (1.13)$$

де  $k$  – кількість перегонів на міжпідстанційній зоні.

Імовірність спільної появи у двох поїздів режиму тяги одного поїзда прямого напрямку та режиму рекуперації в іншого поїзда зворотного напрямку визначається добутком імовірності появи цих режимів, оскільки вони незалежні один від одного:

$$P(\tau_1, p_2) = \frac{\sum_{i=1}^k t_{\tau_1 i} \sum_{i=1}^k t_{p_2 i}}{\sum_{i=1}^k t_{x_1 i} \sum_{i=1}^k t_{x_2 i}}. \quad (1.14)$$

При цьому можливо збіг аналогічних режимів ( $p_1$ ) і ( $\tau_2$ ) при русі поїздів по інших перегонах. Так як ці події несумісні, то ймовірність того, що режими рекуперації і тяги у двох поїздів будуть збігатися, оцінимо як суму ймовірностей:

$$P(\tau_1, p_2) = \frac{\sum_{i=1}^k t_{\tau_1 i} \sum_{i=1}^k t_{p_2 i}}{\sum_{i=1}^k t_{x_1 i} \sum_{i=1}^k t_{x_2 i}} + \frac{\sum_{i=1}^k t_{p_1 i} \sum_{i=1}^k t_{\tau_2 i}}{\sum_{i=1}^k t_{x_1 i} \sum_{i=1}^k t_{x_2 i}}. \quad (1.15)$$

Для двох поїздів ця ймовірність тим більше, чим більше перегонів. При цьому не враховується можливість збігу режимів тяги і рекуперації в обох поїздах, а також випадки відсутності поїздів у режимі тяги при наявності електропоїздів в режимі рекуперації. У міру збільшення числа поїздів буде виникати число можливих сполучень режимів у різних потягів, що буде сприяти підвищенню ймовірності збігу режимів тяги і рекуперації у різних потягів. Остаточна формула для визначення ймовірності збігу режимів у  $n_0$  поїздів має вигляд

$$P(\tau, p) = \frac{n_0!}{2(n_0 - 2)!} = \frac{\sum_{i=1}^k t_{p1i} \sum_{i=1}^k t_{\tau2i} + \sum_{i=1}^k t_{\tau1i} \sum_{i=1}^k t_{p2i}}{\sum_{i=1}^k t_{x1i} \sum_{i=1}^k t_{x2i}}. \quad (1.16)$$

Оцінимо число поїздів, що забезпечують імовірність збігу режимів, близьку до одиниці. При цьому повинна виконуватися наступна умова:

$$\frac{n_0!}{(n_0 - 2)!} = \frac{2 \sum_{i=1}^k t_{x1i} \sum_{i=1}^k t_{x2i}}{\sum_{i=1}^k t_{p1i} \sum_{i=1}^k t_{\tau2i} + \sum_{i=1}^k t_{\tau1i} \sum_{i=1}^k t_{p2i}}. \quad (1.17)$$

Якщо значення часу ходу тяги і рекуперації задані в частках від загального часу ходу (позначимо їх  $t'$  з відповідними індексами), то

$$n_0 = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2}{t'_{p1}t'_{\tau2} + t'_{p2}t'_{\tau1}}}. \quad (1.18)$$

Наприклад при технічній швидкості поїздів  $v = 60$  км/год  $t'_{p1} = t'_{p2} = 0,1$ , а  $t'_{\tau1} = t'_{\tau2} = 0,2$  маємо  $n_0 = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{2}{0,04}} = 7,59 \approx 8$  поїздів. При більш високій технічній швидкості, наприклад при  $v = 80$  км/год  $t'_{p1} = t'_{p2} = 0,18$ , а  $t'_{\tau1} = t'_{\tau2} = 0,44$  маємо  $n_0 = 4,08 \approx 4$  поїзди.

Таким чином, чим більше  $n_0$ ,  $t_{\tau}$  і  $t_p$ , тим більше ймовірність збігу режимів тяги і рекуперації, тобто тим більш надійно буде забезпечуватися режим рекуперативного гальмування. Отже, підвищення технічної швидкості сприяє підвищенню ефективності застосування рекуперативного гальмування.

Даний підхід до вирішення проблеми підвищення ефективності використання енергії рекуперації застосовується на ділянках, для яких характерний завантажений графік руху поїздів. У разі ж зниження обсягу залізничних перевезень і зростання міжпоїзних інтервалів струми рекуперації надходять до електровозів (у режимі тяги), що знаходиться через одну, а іноді і через дві міжпід-

станційні зони, від рекуперуючого електропоїзда. Вплив міжпоїзних інтервалів на ефективність споживання енергії рекуперації досліджено в [23, 38-40].

Якщо врахувати, що струм, що генерується високошвидкісними електропоїздами в режимі рекуперації, досягає значення 1000...1500 А, то в разі протікання такого струму по контактній підвісці 2МФ-100+М-120 і при відстані між підстанціями 15...20 км миттєві значення втрати напруги в тяговій мережі можуть досягати 400 В, що призводить при нарузі на шинах підстанції 3600 В до появи на струмоприймачі рекуперативного електропоїзда напруги вище 4000 В, а це неприпустимо. Таким чином, в наслідок можливого перевищення допустимого значення напруги на струмоприймачі рекуперативних електропоїздів струм а отже потік потужності рекуперації на сусідні ділянки у разі значного віддалення місця гальмування практично не можуть бути дуже великими.

Використання методу накладання дає можливість проводити детальний аналіз струморозподілу рекуперації енергії та енергії, що надходить в систему тягового електропостачання з системи зовнішнього електропостачання. На підставі такого аналізу для кожної підстанції розрахункової ділянки можуть бути визначені значення перетоків енергії рекуперації через шини 3,3 кВ по кожному фідеру, а для кожної міжпідстанційної зони можна визначити значення спожитої енергії рекуперації.

Аналіз виконаних розрахунків в [20] показує, що рух поїздів в режимі рекуперації у місцях застосування рекуперативного гальмування на швидкостях, менших від допустимих, при послідовно-паралельному з'єднанні тягових двигунів значно збільшує відстань передачі енергії рекуперації, підвищуючи надійність застосування даного виду гальмування.

Таким чином, при вивченні питання впливу швидкості руху рекуперативного поїзда на ефективність використання енергії рекуперації крім значень кількості поїздів і часу їх перебігу в режимах тяги і рекуперації необхідно враховувати значення рекуперативних струмів і взаємне розташування навантажень на ділянці.

### 1.2.4. Вплив експлуатаційних параметрів ділянок руху

Залізниці України володіють у своєму розпорядженні широкими можливостями для розширення полігону рекуперації. У разі переведення всього парку пасажирських поїздів на електричне опалення та кондиціювання повітря, відкривається широка можливість використання для цих цілей рекуперації енергії безпосередньо від електровозів (особливо в поєднанні з накопичувачем енергії).

По мережі магістральних залізниць України профіль експлуатованих електрифікованих ділянок характеризується переважно малими і середніми ухилами (рис. 1.17) [32, 33]. Важкі умови відносяться переважно до Донецької та Львівської залізниць.

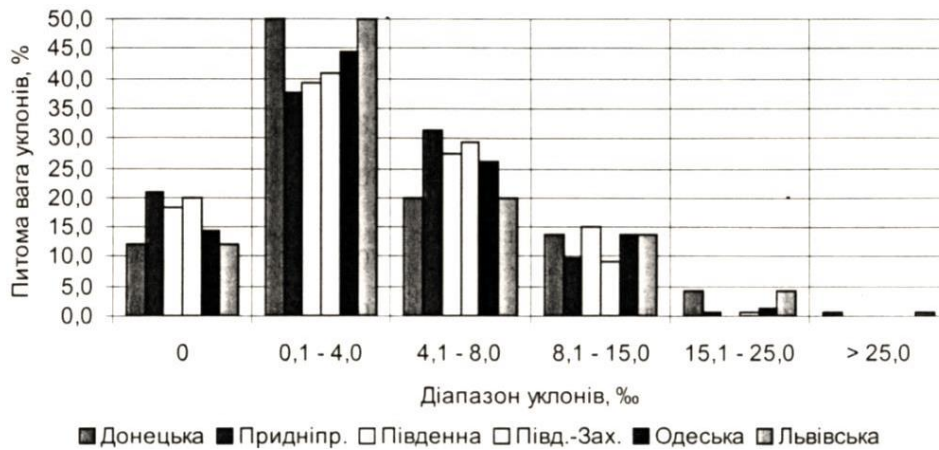


Рисунок 1.17 – Розподіл ухилів по мережі електрифікованих залізниць України

Залежність питомої енергії рекуперації, одержуваної при пригальмовуванні вантажного поїзда вагою 3000...3500 т на шкідливих спусках різного ухилу, при підході до спуску зі швидкістю 80 км/год наведена на рис. 1.18 [32].

Можна відзначити першочергове значення РГ при формуванні власне ГРП на ділянках з затяжними спусками, особливо крутими (при  $i \geq 9$  ‰), де застосування тільки автогальм знижує пропускну здатність ділянки. В [32] наводяться результати розрахунку кількості пар вантажних поїздів, що пропускаються по ділянці з крутим затяжним спуском і щільним графіком руху (з заповненням

80 %) в залежності від величини ухилу при дотриманні жорсткого міжпоїздного інтервалу.

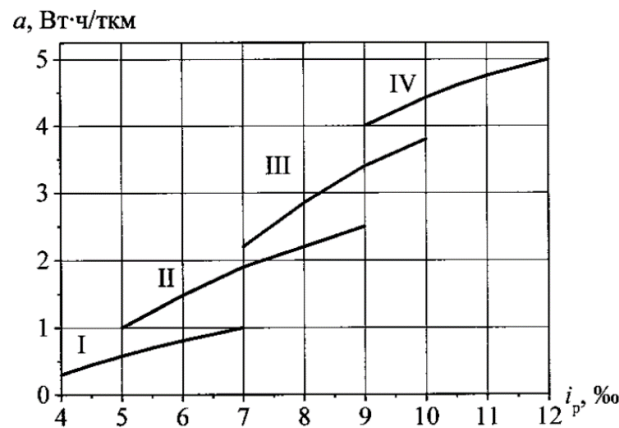


Рисунок 1.18 – Питома енергія рекуперації при гальмуванні поїзда з вагою 3000...3500 т в залежності від величини ухилу шкідливого спуску (I при  $4 \leq i \leq 7$  ‰, II при  $5 \leq i \leq 9$  ‰, III при  $7 \leq i \leq 10$  ‰, IV при  $10 \leq i \leq 12$  ‰)

На рис. 1. наведено порівняння варіантів руху поїздів з використанням тільки автогальм та наявності електричного гальма.



Рисунок 1.19 – Кількість пар поїздів на добу на ділянці зі спуском в залежності від системи гальмування поїзда і ухилу ділянки

Механічна стійкість, відсутність стирання і перегріву гальмівних колодок і бандажів колісних пар, зниження витрати електроенергії, підвищення напруги

на струмоприймачах зустрічних поїздів, що йдуть на підйом (на двоколійних ділянках) і збільшення їх швидкості, а також додатковий фактор підвищення безпеки руху (автогальма перебувають у постійній готовності) роблять РГ на спусках обов'язковим. Деяка економія електроенергії за рахунок застосування РГ також досягається за рахунок зниження енергоспоживання поїздів на власні потреби (зменшується час роботи мотор-компресорів).

### **1.2.5. Вплив рекуперації енергії на стан верхньої будови колії, динаміку поїздів та суміжні системи**

Незалежно від того, застосовується реостатне або рекуперативного гальмування, процес взаємодії рухомого складу і верхньої будови колії визначається наступними чинниками: наявністю ухилів і кривих ділянок колії, вагою, довжиною та швидкістю руху поїздів, потужністю локомотива або групи локомотивів, тобто максимальної гальмової сили.

Концентрація великої гальмівної сили (до 80 % від максимальної сили тяги) на короткій ділянці колії (довжині локомотива) призводить до значного зростання угону колії, який перед локомотивом не завантажений – на ньому немає рухомого складу (в процесі тяги шлях завантажений, тому угін менший). Це призводить до обривів рейкових з'єднувачів, руйнування ізоляційних стиків, збоїв у роботі рейкових кіл та пристроїв АЛС.

Крім того, висока гальмівна ефективність в голові поїзда та набігання незагальмованих задніх вагонів сприяють встановленню вагонів першої третини поїзда в рейковій колії з перекосом. Останнє веде до підвищеного тертя гребнів колісних пар вагонів у бічних поверхах рейок, підвищеного угону колії і його розшивці, зростанню бокового зносу рейок, подрізу бандажів колісних пар вагонів і навіть локомотивів (при кратній тязі в голові поїзда). Збільшення ваги та довжини поїздів різко погіршує розглянуту ситуацію.

Небезпека вичавлювання вагона обумовлена наступними причинами:

- величиною уповільнення головної частини поїзда, в ролі якої виступає або тільки локомотив при електричному гальмуванні, або локомотив з групою вагонів при пневматичному гальмуванні;
- завантаженням вагона, що визначає положення автозчеплення по висоті і натискання колеса на рейку, створює силу тертя між колесом і рейкою в поперечному напрямку, зменшення якої сприяє вичавленню порожнього вагона;
- ступенем зносу гребня бандажа і бічної грані рейки (як вже відзначалося, саме небезпечне поєднання – новий гребінь і зношена бічна грань рейки);
- поперечною силою, що впливає на колісну пару, особливо при недостатньому підвищенні зовнішньої рейки в кривій, зношеної поверхні катання бандажа і новій рейці і навпаки, при великих значеннях распираючих сил (від перекосу поздовжніх вісей вагонів) при гальмуванні в прямій;
- вагою незагальмованих вагонів хвостової частини поїзда і родом вантажу в них. Ці вагони наносять сильний удар по вагонах, що знаходяться в середній частині поїзда;
- моментом опору обертання візка відносно кузова, який різко зростає при виключенні ресорного підвішування (установці на упор) в наслідок перевантаження вагона;
- зміною характеру бокового зносу рейок;
- різним розташуванням по висоті головок автозчеплень у сусідніх вагонів.

Наприклад, при згинанні рейки на верстаті перед укладанням в криву кінець довжиною близько 1 м залишається не зігнутих. Тому там, де крива великого радіусу різко переходить в пряму, не тільки змінюється характер бокового зносу рейок, але колесо з боку рейки піддається удару, а кут набігання колеса на рейку змінюється. Небезпека вповзання колеса на рейку в такій точці різко зростає в 10 разів і більше.

Особливо це небезпечно при гальмуванні наливних поїздів на спусках взимку, так як вантаж при охолодженні зменшується в об'ємі і отримує можливість переміщатися в цистерні. При цьому передній за напрямом руху візок перевантажується, а задній розвантажується. В процесі гальмування автозчеплен-



ня переднього візку опускається вниз і як би «просідає» під задню, яка розташовується вище. Обидві вони згинаються вгору з такою силою, що у багатьох цистерн ударна розетка деформує буферний брус і стає під кутом до  $15^\circ$  і більше до горизонту. Задній візок в цьому випадку має підвищену ймовірність сходду. Якщо ж врахувати ще наявність поперечних распираючих сил, підвищений момент обертання візку, поєднання нового гребня і зношеною бічною гранню рейки, зміна кривизни рейки в кривій в зоні стику, то вповзання колісної пари на рейки стає цілком імовірним.

Нерідко і монолітний вантаж, погано закріплений, може зміститися на одну сторону і збільшити момент обертання візка відносно кузова, що підтверджується наявністю блискучої поверхні ковзуна з одного боку. Зсув від центру вагона незакріплених ящиків з монолітним вантажем може бути причиною сходду вагона з рейок.

На небезпеку вичавлювання вагонів впливає швидкість. При збільшенні швидкості руху зменшується коефіцієнт зчеплення; крім того, у певні моменти в результаті вертикальних коливань надресорної будови колісна пара частково розвантажується. Все це призводить до зменшення сили тертя між колесом і рейкою в поперечному напрямку і ударному навантаженню рейки гребнем колісної пари. Тому навіть при малих значеннях поперечних складових стискаючих сил, які виникають через перекося вагонів у рейковій колії при стисненні поїзда хвостовими вагонами, відзначається різке зростання горизонтальних сил у колії, що сприяє не тільки її розшивці, але і перекиданню (вивертанню) рейки на прямих ділянках колії.

Однак внаслідок малого коефіцієнта тертя гальмівних колодок при високій швидкості руху поїзда уповільнення головної частини при пневматичному гальмуванні незначне і поздовжні стискаючі сили в середній частині поїзда будуть менше, так як головні вагони легко просуваються, а отже, є менша небезпека вичавлювання.

У разі малої швидкості руху головна частина поїзда інтенсивно уповільнюється, набігання незагальмованих хвостових вагонів збільшує небезпеку вичав-

лювання. При електричному гальмуванні створення великої гальмівної сили (із застосуванням піску) при високій швидкості руху підвищує небезпеку вичавлювання порожнього рухомого складу, що перебуває у головній частині поїзда.

Наостанок треба зазначити, що дослідження питань динамічного впливу зосередженого гальмування на знос верхньої будови колії активно проводилися давно, починаючи з 70-80 років минулого століття вченими і фахівцями багатьох наукових шкіл [13, 34-36]. Результати цих досліджень дозволили зробити висновки про те, що експлуатаційні витрати на відновлення верхньої будови колії, розбалансованого режимами електричного гальмування поїздів практично повністю покриваються економією коштів на ремонт обладнання автогальм, таким чином застосування рекуперації для зниження енергоємності перевезень з цього боку є економічно беззаперечним.

Ще один специфічний негативний прояв режиму рекуперації енергії в системах рейкового електричного транспорту пов'язаний з роботою рейкової мережі. Оскільки земля є хорошим провідником електричного струму, а рейкове коло не має надійної електричної ізоляції від землі, то частина струму, що повертається на підстанцію, відгалужується в землю і проходить як по землі, так і по підземних металевих спорудах (трубах, каркасах підземних споруд, броні і оболонках кабелів та ін.). Для протикорозійного захисту металоконструкцій від протікання тягового струму застосовується катодний захист, який перестає функціонувати в умовах зміни полярності блукаючих струмів, що має місце в режимі рекуперації транспортних засобів. Оскільки в цьому випадку позитивний потенціал переходить на рейки та рухається в просторі, то статичні системи поляризованого дренажу стають не ефективними. Зниження впливу блукаючих струмів на суміжні металоконструкції, в тому числі при рекуперації енергії, виконується в напрямку зменшення поздовжнього опору рейкової мережі та збільшення перехідного опору між рейками і землею. Це досягається за допомогою переходу до безстикової колії, з'єднання стиків і окремих ланок всіх ниток рейок мідними проводами для їх паралельної роботи, використанні щебеневого або гравійного баласту рейкової колії, встановлення ізолюючих деталей між рейками

і арматурою залізобетонних шпал, просочуванні дерев'яних шпал в масляних ізоляційних рідинах.

### **1.3. Показники ефективності рекуперації енергії**

Використання режимів рекуперації енергії в системі електричної тяги зачіпає інтереси багатьох підсистем, таких як організація руху, тягове електропостачання, рухомий склад, колія, пристрої автоматики і зв'язку. Так, наприклад, різні підрозділи залізниць мають як позитивні, так і негативні приклади впливу рекуперативного гальмування на їх експлуатаційні показники. Практично в кожному господарстві і службі залізниці виникають додаткові витрати, що необхідні для забезпечення можливості застосування рекуперації, так і прибутки, що утворюються за рахунок генерації і економії електроенергії, підвищення пропускних здібностей ділянок доріг, забезпечення безпеки руху поїздів і поліпшення ряду інших експлуатаційних показників перевізного процесу. Тому за аналогією з важковаговим рухом, віддачу від рекуперативного гальмування можна оцінювати тільки за сумарним економічним ефектом, що досягається в цілому по мережі залізниць, а не по окремих дорогах і їх господарствам.

До комплексу факторів, що визначають необхідність і можливість застосування рекуперативного гальмування, відносяться наступні.

По господарству руху:

- підвищення пропускної спроможності ділянок доріг за рахунок підвищення швидкості на спусках, зниження часу обробки составів після спуску;
- прискорення обороту локомотивів і вагонів, у зв'язку з цим зниження їх потреби;
- підвищення безпеки руху поїздів за рахунок наявності в поїзді додаткового засобу гальмування.

По локомотивному господарству:

- зниження питомої витрати електроенергії на тягу поїздів за рахунок її повернення в контактну мережу та зниження витрат на власні потреби ЕРС;

- підвищення технічної швидкості руху за рахунок особливостей характеристик рекуперативного гальмування – підтримка постійної швидкості на спусках (замість її перепадів при поєднанні режимів пневматичного гальмування і вибігу);
- збільшення середньодобового пробігу і продуктивності локомотивів за рахунок зростання технічної швидкості, а також зниження часу простою локомотива з поїздом на станціях обробки (немає масової заміни колодок).

По господарству електропостачання – економія електричної енергії при рекуперативному гальмуванні та підвищення напруги в тяговій мережі.

По вагонному господарству:

- економія гальмівних колодок і зниження витрат на їх заміну;
- економія на обточуванні колісних пар.

На ділянках з електричним (реостатним і рекуперативним) гальмуванням внаслідок підвищеного впливу на колію, в основному в поперечному напрямку, збільшується інтенсивність бокового зносу рейок вихід дерев'яних шпал, вилучення елементів стикових, проміжних скріплень і протиугонів

В роботі [35] наведені дані про збільшення вартості утримання колії на гірських ділянках при різних режимах – тяга, вибіг і гальмування (пневматичне і рекуперативного) для поїздів масою до 4000 т. Характерно, що як для режиму тяги на підйомі, так і для режиму рекуперації на спусках здоров'я утримання колії (по відношенню до рівнинних ділянок) практично однаково. Різниця між пневматичним гальмуванням і рекуперацією (так само як і реостатним гальмуванням) становить лише частину підвищення витрат на утримання шляху на затяжних спусках.

Найбільша економія коштів досягається в господарстві управління перевезеннями, вагонному господарстві і в господарстві електропостачання. Значні витрати від рекуперації несе колійне господарство. У локомотивному господарстві, господарстві сигналізації та зв'язку витрати, пов'язані із застосуванням рекуперації, в порівнянні з зазначеними підрозділами незначні.

Встановлено, що найбільша віддача від повернення електроенергії в контактну мережу (при зіставленні економії і витрат) спостерігається після проведення ремонту колії. По мірі пропущеного вантажопотоку ефективність знижується за рахунок розладу колії. При деякому пороговому значенні сумарні витрати на підтримку шляху починають перевершувати доходи від застосування рекуперативного гальмування. Так, залежно від радіуса кривих (300...650 м) і ухилу (9...18 %), його величина коливається від 300 до 600 млн ткм брутто. Після досягнення цього порогу доцільно проводити капітальний або середній ремонт колії. Однак їх терміни можуть бути меншими, ніж економічно доцільні за умовами міцності і надійності колії.

Важливо відзначити, що при максимальних розмірах руху вантажних поїздів, що перевищують 85 % заповнення пропускних спроможностей, вираш у вартості виражений від зниження втрат в поїздо-годинах на ділянках з великими спусками починає значно (майже на порядок) перевищувати витрати на реалізацію рекуперативного гальмування по всім господарствам. При критичному заповненні графіка руху поїздів (вище 90 %) рекуперативна стає абсолютно необхідною за умов забезпечення перевезень.

Оскільки вантажообіг на електрифікованих ділянках останнім часом наближається до порогу заповнення пропускних здібностей, ефективність використання рекуперативного гальмування важко переоцінити. Враховуючи сказане, необхідно спрямувати зусилля всіх причетних господарств не на протидію розширення полігонів використання рекуперативної, а на пошук технічних рішень, що знижують її негативні наслідки, як загальногалузеве завдання.

У суміжних господарствах повинні бути вжиті заходи, що зменшують негативний вплив рекуперативного гальмування на експлуатаційні показники. Так у колійному господарстві необхідно створювати посилені колійні конструкції, в локомотивному і електропостачанні – компенсувати реактивну потужність і знижувати гармонійний склад струмів рекуперативної. В господарстві автоматики, телемеханіки і зв'язку слід підвищувати перешкодозахищеність рейкових кіл. У ряді випадків, можливо, доведеться відійти від типових конструкцій і пристроїв

і прийняти нестандартні рішення, орієнтовані для застосування на ділянках стійкої рекуперації енергії.

При цьому, підвищення середньосітьового коефіцієнту повернення електроенергії навіть на 1 % перебиває річну ефективність усіх заходів енергозбереження в області електричної тяги. Сумарно подібне призводить до зниження на 0,5...0,7 % питомої витрати електроенергії на тягу поїздів.

Істотно, коли в умовах енергодефіциту ведеться всебічний пошук альтернативних джерел енергії (вітер, сонце, біопаливо, диверсифікація вугілля і т.д.), нехтувати таким потужним джерелом, як обернена кінетична енергія потягу, не можливо. Застосуванню рекуперації повинно сприяти впровадження сучасних високоенергоємких накопичувачів енергії, які в найближчі роки можуть бути доступні для систем тягового електропостачання.

Отже, проблема підвищення ефективності використання рекуперації енергії є багатofакторною і багаторівневою, оскільки зачіпає питання одночасного взаємодії декількох підсистем системи електричної тяги, тому вимагає комплексного підходу до її вирішення. Основні взаємозв'язки підсистем електричної тяги при реалізації режимів рекуперації наведено на рис. 1.20.

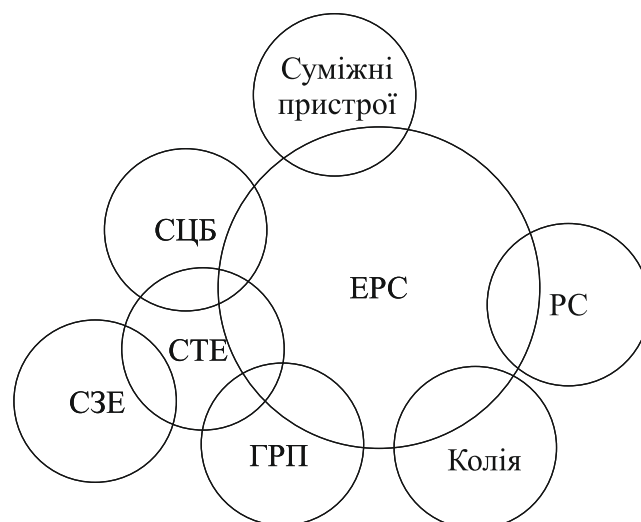


Рисунок 1.20 – Структурна діаграма взаємодіючих підсистем СЕТ

На сьогодні розроблені методи оптимізації режимів рекуперації в системах транспорту є переважно однопараметричними і вирішують завдання по одному з критеріїв ефективності функціонування однієї підсистеми, за який приймається або максимум енергозбереження при РГ [3-6, 8, 17-28, 32, 33, 37-40], або мінімум негативного впливу режимів рекуперації на СТЕ і суміжні підсистеми [13, 17, 34, 35, 36, 41-57]. При вирішенні даної задачі відсутній системний підхід і врахування взаємного впливу параметрів оптимізації РГ на отримання бажаного економічного ефекту.

Аналіз взаємодій підсистем СЕТ при рекуперації ЕРС дозволяє виділити і класифікувати основні показники ефективності використання рекуперації енергії, яким повинні задовольняти режими РГ (рис. 1.21).

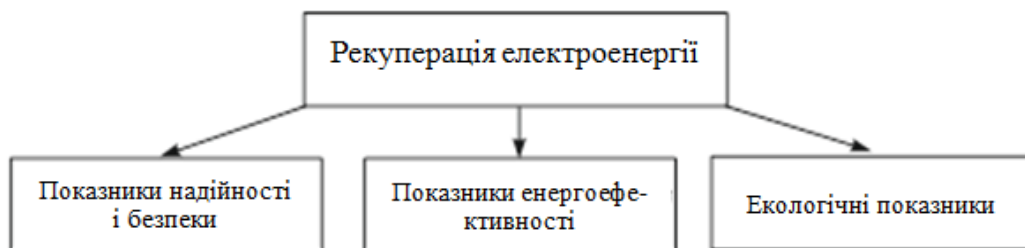


Рисунок 1.21 – Показники ефективності застосування рекуперації

Структурування основних показників ефективності рекуперації щодо різних зрізів взаємодіючих підсистем СЕТ з урахуванням їх взаємного впливу один на одного та область їх раціональних значень наведена табл. 1.3.

З табл. 1.3 випливає наявність таких показників ефективності рекуперації, при підвищенні яких знижуються інші, тому, вдосконалення режимів РГ при реалізації всіх цільових функцій являє собою рішення задачі оптимізації. Кожен показник у свою чергу є складною функцією багатьох змінних, врахування яких є складною задачею через їх невизначеність та імовірнісну складову.

Таблиця 1.3 – Класифікація основних показників ефективності рекуперації

Взаємодіючі підсистеми СЕТ	Показники ефективності застосування рекуперації		
	Надійність і безпека	Показники енергоефективності	Екологічні показники
ЕРС-СТЕ	Напруга на струмоприймачі $U_c \leq U_{км}^{max}$ ; безвідмовна робота інших ЕРС при порушенні режиму напруги $U_c > U_{км}^{max}$	Енергія рекуперації $W_{рек} \rightarrow max$ ; втрати енергії рекуперації $\Delta W_{рек} \rightarrow min$	Гранично допустиме випромінювання електромагнітного поля, $E_{max} \leq E_{доп}$ $H_{max} \leq H_{доп}$ ; викиди $CO_2 \rightarrow min$ ; мінімум блукаючих струмів
ЕРС-СЦБ	Гранично допустимий рівень завад від струму рекуперації $k_T \rightarrow min$	Енергія рекуперації $W_{рек} \rightarrow max$ ; втрати енергії рекуперації $\Delta W_{рек} \rightarrow min$	
СТЕ-СЗЕ	Якість енергії рекуперації: пік-фактор $\Pi \rightarrow min$ ; коэф. форми $k_\phi \rightarrow 1$ ; коэф. гарм. $k_T \rightarrow min$ ; коэф. несим. $k_{U2} \rightarrow min$	Енергія рекуперації $W_{рек} \rightarrow max$ ; втрати енергії рекуперації $\Delta W_{рек} \rightarrow min$ ; надлишкова енергія рекуперації $W_{рек}^{надл} \rightarrow min$	
ЕРС-колія	Міжремонтні терміни $T_{рем} \rightarrow max$	Енергія рекуперації $W_{рек} \rightarrow max$ ; збиток від уgonу рейок $U_{угон} \rightarrow min$	
ЕРС-РС	Збільшення ресурсу мех. гальм і бандажів (міжрем. пробігу) $T_{рем} \rightarrow max$	Енергія рекуперації $W_{рек} \rightarrow max$	Викиди металевого пилу $\Delta m \rightarrow min$

#### 1.4. Аналіз методів підвищення ефективності використання електроенергії рекуперації

Розв'язання проблеми споживання надлишкової енергії рекуперації в системах електричного транспорту базується на основі аналізу основних факторів, що впливають на ефективність рекуперації (п.п. 1.2). На сьогодні дана проблема вирішується за декількома напрямками, що мають свої переваги і певні недоліки []. Принципово можна виділити три напрями розв'язання проблеми вико-



ристання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту, що структурно представлено на рис. 1.22.



Рисунок 1.22 – Класифікація методів підвищення ефективності використання рекуперації електроенергії в системах електрифікованого транспорту

При зупиночному гальмуванні транспортних засобів має місце короткочасна генерація енергії, яка може бути охарактеризована показниками, наведеними в [8, 51, 52]. Враховуючи це, передача енергії гальмування поїздів з тягової мережі через тягові підстанції (ТП) в зовнішню мережу (на ділянках постійного струму – через інвертують ТП) можлива за умови, коли її прийом мережею узгоджено як в технічному, так і комерційному аспектах, таких як [40]:

- максимально допустима короткочасна потужність, приймається мережею;
- прийнятний рівень гармонік;
- готовність енергопостачальної компанії до рефінансування.

Вимірювання, проведені на гірських ділянках з інвертуючими ТП постійного струму [48] показують, що ефективність споживання надлишкової енергії рекуперації системою зовнішнього електропостачання (на приєднаннях 35, 110, 220 кВ) залежить від режимів нетягових навантажень у вузлах приєднання ТП, особливо в періоди, коли енергосистема є недовантаженою. Відсутність необхідного рівня нетягових навантажень в живильній мережі призводить до підви-

щення напруги на вводах ТП в режимі рекуперації та припинення передачі енергії з тягової мережі, і відповідно відключення рекуперації на рухомому складі за умовою максимально допустимого напруги на струмоприймачі.

Крім цього, експериментально встановлено, що при підключенні суміжних інверторних ТП до ліній різного рівня напруги рекуперація енергії поблизу однієї ТП (підключеної 35 кВ) може не призводити до її переходу в інверторний режим, а передача надлишкової енергії гальмування поїзда відбувається через віддалену ТП (підключену до 110 кВ). У даному випадку має місце нерівномірний розподіл завантаження інвертуючих ТП в режимі рекуперації, що призводить до збільшення втрат енергії рекуперації в тягових мережах.

Так при поверненні надлишкової енергії рекуперації в метрополітенах та системах міського електротранспорту, внаслідок імпульсного характеру потужності рекуперації, її повернення до первинної енергосистеми може погіршувати режими живлення нетягових споживачів, приєднаних в загальному вузлі з відповідною ТП. Крім того використання інверторів для повернення енергії в зовнішню енергосистему володіє ще рядом істотних недоліків [40]:

- ускладнюється обладнання тягових підстанцій;
- при включенні інвертора в мережу можуть виникати циркуляційні струми в контурі, утвореному з випрямлячами (перекачка енергії при відсутності рекуперації);
- енергія на виході інверторів, що передається в первинну мережу, як правило носить імпульсний характер і має низьку якість, що не відповідає вимогам [62];
- знижується ККД рекуперації за рахунок додаткового вузла перетворення енергії;
- погіршується режим живлення нетягових споживачів;
- значно підвищується напруга в контактній мережі.

Для забезпечення якості електроенергії рекуперації згідно з вимогами [15, 16, 62] необхідно значне вдосконалення і ускладнення обладнання тягових під-

станцій, які виконують прийом та передачу надлишкової енергії рекуперації в первинну енергосистему.

Тут важливо зазначити, що повернення надлишкової енергії рекуперації з систем транспорту циклічного руху в первинну енергосистему можливо тільки за умови, що рівні нетягового навантаження енергосистеми у вузлах приєднання ТП достатні для поглинання енергії  $W_{\text{надл рек}}$ .

Одним із перспективних і активно досліджуваних шляхів підвищення ефективності використання енергії рекуперації  $W_{\text{рек надл}}$  в системах електрифікованого транспорту незалежно від режимів навантаження зовнішньої енергосистеми є локальна буферизація цієї енергії шляхом застосування накопичувачів, які також дозволяють суттєво вирівнювати тягове навантаження. Теоретичні основи виростання накопичувачів в електроенергетичних системах розглядаються в [63]. Дослідженню питань використання накопичувачів в транспортних системах присвячена велика кількість праць, серед яких варто відмітити [8, 58, 59, 64-128].

В даний час в деяких метрополітенах міст Західної Європи (м. Гамбург, м. Лондон) існує позитивний досвід використання інерційних механічних накопичувачів, комплекс з 2...5 енергоблоків яких дозволяє акумулювати енергію потужністю 1,5...2,5 МВт, що дозволяє забезпечити пуск та розгін до швидкості 60 км/год двох електропоїздів [107, 109, 112]. Використання ємнісних або надпровідних індуктивних НЕ на сьогодні ще не отримало розповсюдження і перебуває на стадії тестової експлуатації.

Альтернативою застосування накопичувачів в системі тягового електропостачання є їх установка безпосередньо на електропоїздах, що з енергетичної точки зору є найбільш оптимальним [64, 65, 69, 71, 76, ]. Перевагою такого розташування є мінімізація втрат енергії рекуперації при її передачі до накопичувача і відсутність впливу енергії рекуперації на показники якості електроенергії системи зовнішнього електропостачання. Недоліком є погіршення масогабаритних показників електропоїздів. У цьому зв'язку питання про оптимальне роз-

ташування накопичувача в системі електрифікованого транспорту потребує відповідного техніко-економічного обґрунтування [67, 68, 82-88]

Таким чином, при використанні рекуперації можливі наступні варіанти використання енергії:

- рекуперована енергія електрорухомим складом (ЕРС) в тягову мережу може поглинатися тільки іншими поїздами, що працюють у тяговому режимі, а при наявності надлишкової енергії вона гаситься безпосередньо на поїзді (реостатне гальмування) або на тяговій підстанції (стаціонарне пристрій гасіння надлишкової енергії рекуперації);
- тягові підстанції дообладнуються інверторними агрегатами ІА, причому ІА може бути поєднаний з ВА;
- у системі застосовуються накопичувачі енергії НЕ, енергоємність яких повинна бути розрахована на поглинання енергії рекуперації, причому накопичувачі можуть бути встановлені на фідерах тягової підстанції, в середині фідерної зони, а також безпосередньо на поїзді.

В умовах наземного залізничного транспорту, зокрема системи приміських сполучень, розміщення тягових підстанцій не пов'язано з зупинними пунктами і, крім того, залежно від реалізованого графіка руху до фідерної зони кожної тягової підстанції одночасно може знаходитися декілька поїздів в режимі рекуперації. Тому задача вибору енергоємності накопичувача повинна вирішуватися методом статистичного моделювання. Тут в результаті моделювання може бути отримана залежність між енергоємністю накопичувача  $E_H$  і величиною надлишкової енергії рекуперації  $W_{\text{рек надл}}$ .

Оцінка нерівномірності електроспоживання в електричній тязі може бути виконана методом статистичного моделювання. При цьому в якості вихідних даних доцільно прийняти статистичні оцінки, які характеризують типову діаграму руху поїзда приміського сполучення або метро, яка показана на рис. 1.2. Змінними параметрами тут за один характерний цикл руху є:

- тривалість роботи  $T_g$  тягових двигунів у включеному стані;

- тривалість  $T_0$  відключеного стану тягових двигунів (вибіг, гальмування без включення тягових двигунів в генераторний режим, зупинка);
- амплітуда пускового струму  $I_{\max}$ , яка в сучасних потягах регулюється машиністом або автоматично. Наприклад, на поїздах EP2T і ЕПЛ2Т є 7 уставок  $I_{\max}$ ;
- амплітуда струму власних потреб  $I_0$  (споживаного при відключених тягових двигунах та істотно залежить від включення електроопалення і т д). Зазвичай  $I_0 = 5...8$  А в літньому режимі і  $20...35$  А в зимовому режимі для секції (М + П) приміського електропоїзда постійного струму 3 кВ.

Значення основних параметрів, що визначають властивості головних типів накопичувачів енергії, наведені в табл. 1.4 [8].

Таблиця 1.4. – Енергетичні та розрядні показники різних типів НЕ

Тип НЕ		Питома енергія, Дж/г	Час виводу енергії, с
Зі статичною активною зоною	Хімічний	$10^2...10^5$	$1...10^5$
	Індуктивний	$1...10$	$10^{-3}...10$
	Ємнісний	$0,1...0,5$	$10^{-6}...10^{-2}$
З динамічною активною зоною	Механічний	$10...10^3$	$1...10^3$
	Електромеханічний	$1...10$	$10^{-2}...10$
	Електродинамічний	$0,05...1$	$10^{-3}...10^{-2}$

На рис. 1.23 показано деякі обрані типи НЕ, причому для порівняння ефективності їх застосування наведені питомі енергії (відношення накопиченої енергії до маси накопичувача) та питомі потужності (відношення потужності заряду/розряду до маси накопичувача).

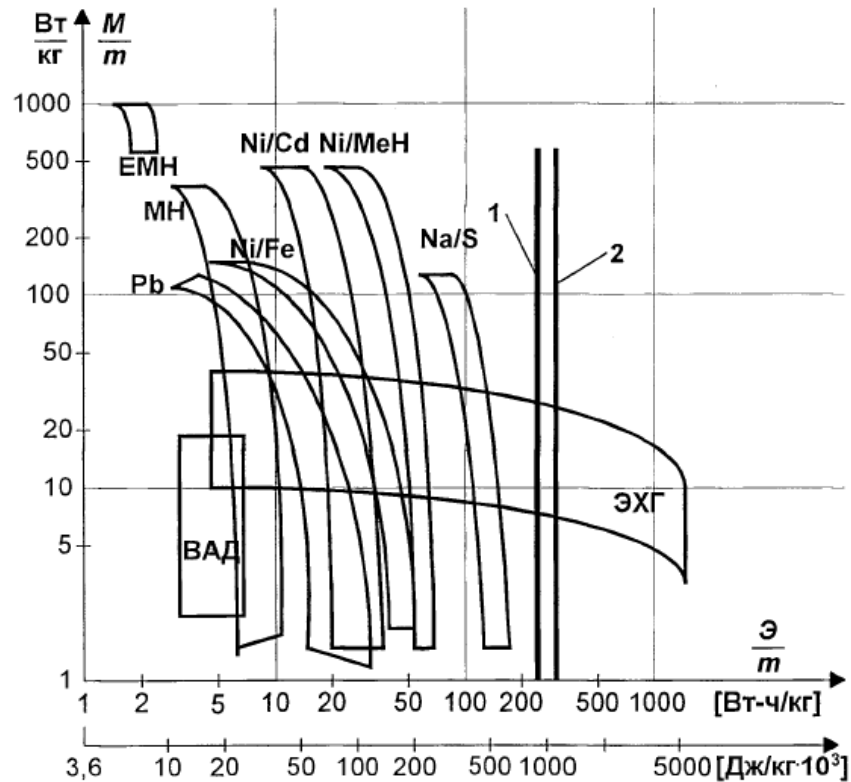


Рисунок 1.23 – Питомі енергетичні характеристики різних типів НЕ

ВАД – повітряні акумулятори тиску,  
 EMH – ємнісні молекулярні накопичувачі,  
 MH – маховічні накопичувачі (типові),  
 ЭХГ – електрохімічні генератори,  
 Pb – свинцевий акумулятор,  
 Ni/Fe – нікель-залізний акумулятор,  
 Ni/Cd – нікель-кадмієвий акумулятор,

Ni/MeH – нікель-гідриднометалевий акумулятор,  
 Na/S – сірчано-натрієвий акумулятор,  
 1 – маховик обідного типу зі склопласту,  
 2 – маховик комбінованого типу (матеріал стрижнів - органопласт, матеріал обода – скловолокно).

Для використання ІНЕ в СТЕ залізниць перетворювальний агрегат (ПА) повинен мати короточасну пікову потужність до 10 МВт (номінальна потужність 2,5 МВт). Аналіз існуючої напівпровідникової апаратури показав, що ПА на дану потужність зручніше розбити на 6 однакових модулів по 1,7 МВт кожен [58, 69, 72, 112]. Модуль включає в себе два силових напівпровідникових агрегати, а саме реверсивний перетворювач постійної напруги (РППН) і автономний інвертор струму (АІТ) з індуктивним дроселем (Д) між ними. Загальна принципова схема ІНЕ представлена на рис. 1.24. Дана схема була розроблена НТЦ «Синтез» НИИЭФА спільно з МПТом для використання на ділянці малого кільця Московської залізниці.

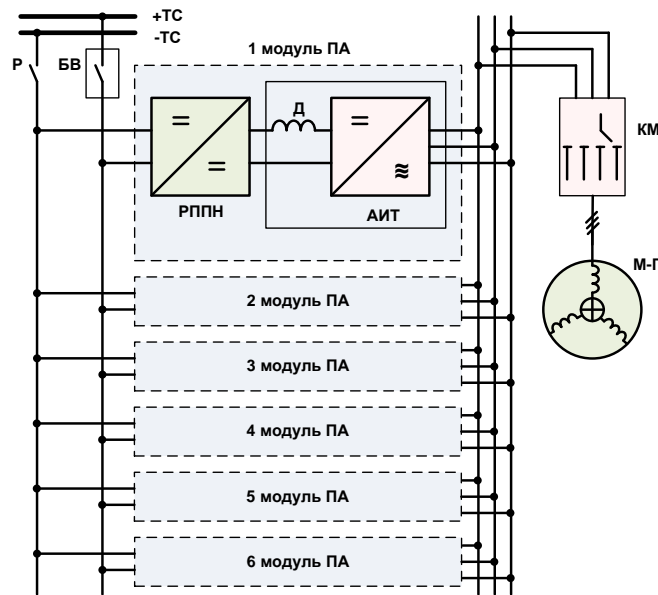


Рисунок 1.24 – Принципова схема ПА для ІНЕ

За проектом розташовуватися ІНЕ повинні були в середині фідерних зон у якості так званих «накопичувальних» ТП потужністю близько 5...10 МВт і енергоємністю 100...150 МДж на одиницю ІНЕ.

Дослідження використання індуктивних накопичувачів енергії в СТЕ залізниць виконано в [58, 89, 90, 125, 126]. Одна з можливих схем підключення надпровідного індукційного накопичувачі (СПІН) до СТЕ залізниць показана на рисунок 1.25. Тут СПІН підключається безпосередньо до шин напруги  $\sim 27,5$  кВ, 50 Гц ТП змінного струму. Акумуляючий елемент (АЕ) через комутаційний модуль (КМ) підключається до перетворювального агрегату. Перетворювальний агрегат складається з імпульсного регулятора постійного струму (ІРПТ) і чотириквadrантного регулятора (4QS), розділених контуром постійного струму з поглинаючою (фільтруючою) вставкою постійного струму (ФТВП). Далі перетворювальний агрегат через трифазну лінію підключається до силового трансформатору (СТ), який, у свою чергу, через роз'єднувач приєднаний до шин  $\sim 27,5$  кВ.

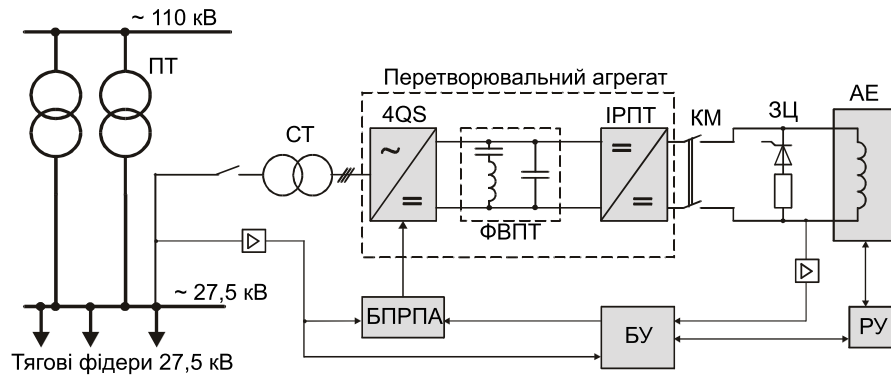


Рисунок 1.25 – Структурна схема підключення СПН до ТП змінного струму

Основними функціями встановлення НЕ в середовищі СТЕ є зниження нерівномірності тягового електроспоживання для зменшення втрат енергії в елементах СЕТ, розширення можливостей застосування рекуперації на ЕРС і зниження встановленої потужності ТП.

Використання НЕ ємнісного типу детально розглядається в роботах [76, 77, 93, 98, 107, 108, 109, 113, 115-117]

Підвищення ефективності рекуперації в умовах зниження або відсутності або значного віддалення тягового електроспоживання на ділянках може бути реалізовано шляхом оптимізації та регулювання рівня напруги холостого ходу на шинах ТП. Дослідження в цьому напрямі проводилися в роботах [20, 129-132].

В якості критерію оптимізації в [20, 130] розглядається максимум перетікання енергії рекуперації через шини тягової підстанції при наявних розмірах руху потягів. В цьому випадку цільова функція може бути представлена як

$$W_{\text{рек}}^{\text{ТП}} = \sum_{i=1}^n W_{\text{рек } i}^{\text{ТП}} (U_{\text{xx } i}) \rightarrow \max, \quad (1.18)$$

де  $W_{\text{рек } i}^{\text{ТП}}$  – перетік енергії рекуперації через шини  $i$ -тої тягової підстанції;

$U_{\text{xx } i}$  – напруга холостого ходу  $i$ -тої тягової підстанції;

$n$  – число тягових підстанцій.



Перетоки потужності рекуперації через шини тягової підстанції будуть збільшуватися із зменшенням напруги холостого ходу на її шинах, тому накладене на розрахунок обмеження може бути записано у вигляді

$$U_{xx i} - \Delta U_{Ti} \geq U_{Tяги}^{\min}, \quad (1.20)$$

де  $U_{Tяги}^{\min}$  – найменша допустима напруга на струмоприймачах електро-  
зів за час ходу їх під струмом, що забезпечує заданий час ходу;

$\Delta U_{Ti}$  – середня втрата напруги в СТЕ від  $i$ -тої тягової підстанції до елект-  
ровоза в тяговому режимі.

Таким чином, завдання підвищення ефективності рекуперації у цьому ви-  
падку полягає у визначенні таких значень напруги холостого ходу на шинах  
тягових підстанцій, які б забезпечили максимум цільової функції (1.18) за наяв-  
ності обмеження (1.20).

В результаті імітаційного моделювання режимів СТЕ в [20] встановлено, що  
оптимізація рівня напруги холостого ходу на шинах ТП дозволяє збільшити обся-  
ги рекуперації енергії на 10 % за рахунок перетікань до віддалених тягових поїздів  
і на 50 % зменшити кількість зривів рекуперативного гальмування, що в результа-  
ті дає зниження електроспоживання на тягу за лічильниками ТП близько 5 %.

Підвищення ефективності рекуперації енергії може бути реалізоване на осно-  
ві оптимізації режимів руху ЕРС за енергетичним критерієм [1, 2, 133-141]. При  
цьому можуть бути зорганізовані оптимальні з точки зору використання енергії  
рекуперації режими тягового електроспоживання, які напряду залежать від потрі-  
бного режиму руху транспортного засобу та його надлишкової потужності.

У ряді робіт [134-137] розроблено енергетично оптимальні режими ве-  
дення поїздів за критеріями мінімуму споживання електроенергії на тягу і її ва-  
рстості з урахуванням диференційованих тарифів, однак питання ефективності  
рекуперації при цьому не розглядаються.

Способи збільшення енергії рекуперації на основі раціональних режимів  
гальмування ЕРС на сьогодні достатньо розроблені. Наприклад, для вантажних  
електровозів розроблені так звані режими інтенсивної рекуперації [32], під якими

розуміється гальмування, що забезпечує збільшення генерованої енергії порівняно з традиційною рекуперацією на спусках за рахунок меншого сповільнення при гальмуванні (більш тривалого гальмування). Раціональне уповільнення пропонується вибирати в діапазоні  $0,02...0,05 \text{ м/с}^2$ , порівняно з традиційним  $0,1...0,4$ , при якому можна збільшити повернення енергії в мережу на 50 %, що пояснюється в роботі більш ефективним використанням потенційної енергії поїзда. Однак такі режими призводять до зростання перегінного часу ходу і зменшення пропускної здатності залізниці, тому в умовах суворого графіка руху не можуть бути реалізовані повною мірою.

У роботі [33] розвиваються дослідження [31] з урахуванням дотримання заданого перегінного часу ходу і графіка руху поїздів з масою до 3000 т на ділянках з ухилами до 6 ‰, де для забезпечення раціонального режиму РГ на ділянках з обмеженням швидкості розроблена удосконалена система автоматичного керування РГ, що забезпечує формування оптимальної гальмівної характеристики поїзда, а також стійкість режиму рекуперації при скачках напруги на струмоприймачі та його відривах від контактного проводу. В умовах Придніпровської залізниці застосування таких заходів дозволяє збільшити віддачу електроенергії в мережу на 1,85 % у порівнянні з традиційними режимами РГ.

В [137] розроблено апаратно-програмний комплекс розрахунку та видачі індивідуальних режимних карт ведення поїзда, у тому числі і для режиму РГ, оптимізованих за критерієм мінімуму витрат енергоресурсів при заданому часу на переміщення вантажного поїзда по ділянці. Індивідуальні режимні карти раціонального ведення поїзда, реалізовані за допомогою апаратно-програмного комплексу, дозволяють отримати економію витрат енергоресурсів на тягу поїздів, а також наблизити рівень управління електровозом молодосвідченими машиністами до рівня досвідченого машиніста і навчити їх вибору раціональних режимів ведення.

У серії фундаментальних праць, зокрема [142, 143], запропоновано метод вибору оптимальної потужності вантажних електровозів, як основного параметра тягового засобу. Так як ряд найважливіших експлуатаційних характеристик

ЕРС залежать від розрахункових швидкості і сили тяги, які зумовлюють масу поїздів та швидкість їх руху, тому в роботі знайдено оптимальне значення розрахункової швидкості руху за умови мінімізації енерговитрат на тягу і часу на рух поїзда. Дана задача є двопараметричною задачею векторної оптимізації, в результаті розв'язку дозволяє отримати множину так званих ефективних управлінь. Показано, що з позицій енергозбереження доцільно експлуатувати електровози з мінімально можливими, що забезпечують задану швидкість, значеннями розрахункової швидкості та номінальної потужності. Викладений у роботі підхід до визначення розрахункової швидкості дозволяє здійснити вибір мінімального значення номінальної потужності для руху з заданою ходовою швидкістю за рахунок граничного використання сили тяги і потужності локомотива. Однак при цьому неможлива компенсація відхилень режимів ведення поїзда від розрахункових, для чого необхідно резервування потужності.

Автором також розроблено концепцію модульного принципу тяги, в основі якої лежить визначення оптимальної градації номінальної потужності ЕРС за умови досягнення мінімуму невикористаної потужності і мінімальної кратності тяги [144], використовуваної в експлуатації. Вихідною інформацією для цього виступає статистика розподілу маси поїздів на конкретних ділянках залізниць, які можуть бути представлені дискретним безліччю множиною  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  або близько вказаних значень допускається незначне коливання маси  $\Delta Q_n$ . Якщо кожному значенню  $Q_k$  і  $\Delta Q_k$  поставити у відповідність значення раціональної потужності ( $P_k \sim Q_k$  і  $\Delta P_k \sim \Delta Q_k$ ), то отримаємо дискретне розподіл потужностей. Далі, використовуючи методи багатокритеріальної оптимізації при відомому розподілі маси поїздів на конкретній ділянці залізниці, в роботі визначається оптимальна потужність тягового модуля для цієї ділянки.

Значна нерівномірність руху поїздів різної маси викликає зростання втрат електроенергії в СТЕ і зниження використання потенціалу енергозбереження від режимів рекуперації. Питанням зниження енергоємності СЕТ на основі оптимізації ГРП присвячена серія наукових досліджень [23, 28, 31, 37-39, 145-

158], де на основі оптимального регулювання транспортного потоку при виконанні заданої перевізної роботи можна знизити електроспоживання на тягу в середньому на 2...5 %, що досягається за рахунок зниження втрат електроенергії в СТЕ шляхом вирівнювання тягових навантажень.

При формуванні оптимальних ГРП за енергетичним критерієм при заданій поїзній роботі за розрахунковий період часу визначення величин тягових навантажень виконують на основі тягових розрахунків або експериментально. При режимних розрахунках використовують виконані, детерміновані та імовірнісні ГРП. Детерміновані графіки застосовуються при визначенні пропускної здатності ділянки дороги по навантажувальній здатності СТЕ. Моделювання на основі імовірнісних графіків виконують при проектуванні СТЕ і визначенні втрат електроенергії в її елементах.

В роботах [145, 156] регулювання транспортного потоку за енергетичним критерієм виконується з допомогою оптимізованого на основі прогнозного електроспоживання ГРП. На базі ітераційного моделювання прогнозного ГРП в [145] виконується визначення кількості електроенергії, у тому числі що генерується ЕРС в режимі рекуперації, а також ступінь її використання поїздами, які реалізують тяговий режим. Оптимізація ГРП і розрахунок показників навантажувальної здатності СТЕ постійного струму виконуються за потужносними характеристиками тягових навантажень, де потужність навантаження ТП розглядається у вигляді функціоналу

$$P_{ТП} = f(P(x(t, \Delta t), X(t, \Delta t))), \quad (1.19)$$

де  $P(x(t, \Delta t), X(t, \Delta t))$  – множина навантажень всіх поїздів на ділянці,

$x(t, \Delta t)$  – координата поїзда,

$X(t, \Delta t)$  – множина координат всіх поїздів на фідерній зоні,

$\Delta t$  – міжпоїздний інтервал.

Функціонал (1.19) у загальному випадку враховує зміну потужності навантажень всіх поїздів на фідерній зоні в залежності від часу, місця їх дислокації та міжпоїздного інтервалу. Формування енергооптимального ГРП при заданій

поїзній роботі за розрахунковий період часу, в тому числі з урахуванням найбільш ефективного використання енергії рекуперації поїздами попутного і зустрічного прямування здійснюється за цільовою функцією

$$W_{СТЭ} = \sum_{n=1}^N \int_0^T f_n(P(x(t, \Delta t), X(t, \Delta t))) dt \rightarrow \min, \quad (1.20)$$

де керуючим параметром виступає величина міжпоїзного інтервалу  $\Delta t^{\text{opt}}$ , мінімальне значення якого вибирається з урахуванням навантажувальної здатності СТЕ і безпеки руху поїздів. В роботі також встановлено, що при оптимальному ГРП за енергетичним критерієм (1.20) ефективне використання енергії рекуперації при попутному проходженні поїздів складає всього 15 %, що вище, ніж при зустрічному їх перетині (10 %). Це пояснюється більш ефективним використанням потужності рекуперації при зниженні міжпоїзного інтервалу при попутному проходженні поїздів і одночасному збігу режиму тяги і рекуперації, що в повній мірі не може враховувати ГРП.

У серії робіт [146-150] на основі використання евристичного алгоритму пошуку мінімуму функції списку розроблений принцип визначення оптимальної послідовності відправлення поїздів різної категорії (різної маси) і інтервалів між тяговими навантаженнями, що забезпечує зменшення втрат електроенергії в СТЕ. У підсумковій роботі [150] автором запропонована оптимізація дислокації тягових навантажень між ТП на основі адаптованого методу деформованого багатогранника. Використання запропонованих алгоритмів оптимізації ГРП дає можливість зменшення втрат електроенергії в СТЕ до 3 % від рівня витрат на тягу поїздів.

В роботі [158] розроблена методика розрахунку наявної пропускної спроможності електрифікованих залізничних ділянок, що включає аналітичні залежності для визначення міжпоїзних інтервалів, що враховують параметри СТЕ, характер тягового навантаження і режими руху поїздів на розрахунковій ділянці. ГРП запропонований в [158], реалізується з метою максимального завантаження СТЕ з мінімально можливими інтервалами між поїздами, однак внаслі-

док нерівномірності розмірів руху не може бути забезпечений в повній мірі, тому розрахункові ГРП як правило, значно відрізняються від фактичних.

В більшості розглянутих робіт з оптимізації ГРП з урахуванням енергетичного критерію відсутні ефективні методики покращення умов рекуперації з урахуванням режимів СЕТ при формуванні графіків. В такому випадку виникає задача побудови оптимального ГРП, що відповідає фактичним розмірам руху, для вирішення якої необхідно розвиток методу розрахунку ГРП з урахуванням режимів роботи СТЕ при наявності рекуперації енергії.

Ефективна реалізація потенціалу рекуперації енергії, особливо в перспективних децентралізованих системах тягового електропостачання, де виникає гостра необхідність в оперативних управліннях енергетичними потоками, на сьогодні є можливою на базі удосконалення систем енергозабезпечення транспорту та застосування в них автоматичного, особливо інтелектуального управління режимами тягового електропостачання. Побудова концепції енергоефективної СТЕ та методологія розрахунку її параметрів розглянуто в серії наукових робіт [159-172], а розвиток оптимальних методів управління режимами СТЕ розглядається у [129-131, 173-196].

Застосування вольтододаткових пристроїв дозволяє плавно регулювати напругу в межах 20 % від номінального значення. В [163-170, 184] підвищення ефективності СТЕ постійного струму запропоновано реалізовувати шляхом переходу на підвищений рівень напруги в КМ, розподілену систему живлення з поздовжньою високовольтною лінією з використанням на ТП нових перетворювальних агрегатів вольтододаточного типу, а також комбінованої активної фільтрації гармонік в СТЕ.

Основною метою оптимізації режимів СТЕ за критерієм повної реалізації потенціалу рекуперації енергії з урахуванням ряду існуючих обмежень є забезпечення таких режимів роботи СТЕ, при яких режим рекуперації на ЕРС буде можливий при будь-якій ситуації на фідерній зоні. Для ефективного реалізації цього крім оптимальних алгоритмів функціонування СТЕ потрібне впровадження технічних засобів, що потребують детального економічного обґрунту-

вання. Раціональне управління режимами СТЕ передбачає оперативний аналіз інформації на різних рівнях реалізації автоматичного регулювання енергетичних потоків в СТЕ, що забезпечують надійну рекуперацію енергії.

В [193] розроблена концепція раціонального електроспоживання в СТЕ, що базується на інтегрованій системі керування пристроями електропостачання з розподіленим інтелектом і експертній системі прийняття рішень. Узагальнена схема оперативного регулювання СТЕ може бути представлена в наступному вигляді [148]:

$$Y = F(X^e, U, C), \quad X^e = (X^*, X_E), \quad U = f(X^e, Y^*, Z^*), \quad C = (c_1, \dots, c_m), \quad (1.21)$$

де  $F$  – оператор СТЕ як об'єкта управління, задає алгоритм визначення виходу

системи  $Y$  за вхідною інформацією  $X^e$  і керуючим впливом  $U$ ,

$f(X^e, Y^*, Z^*)$  – алгоритм управління, що враховує задані цілі управління і доступну інформацію,

$C = (c_1, \dots, c_m)$  – вектор параметрів СТЕ, необхідних для побудови схеми системи регулювання електропостачання.

Комплексні інформаційні технології, що забезпечують реалізацію енергозберігаючих режимів роботи СТЕ залізниць з урахуванням режимів роботи СЗЕ розроблені в [194, 195]. В роботі виконаний аналіз режимів роботи існуючих і перспективних СТЕ і показано шляхи реалізації енергозберігаючих технологій.

В [197] запропоновано метод визначення раціональних режимів СТЕ на основі адаптованого генетичного алгоритму. Такий підхід дозволяє розраховувати регламент перемикачів обладнання на ТП і МПЗ з метою зменшення витрат на втрати електроенергії в тяговій мережі. Керуючими параметрами СТЕ є положення перемикачів відгалужень силових трансформаторів, які за фіксованою схемою електропостачання визначають напругу на струмоприймачах ЕРС.

У серії робіт [186-189] сформульована концепція ситуаційного керування режимами СТЕ змінного струму з урахуванням ряду технічних обмежень. Реалізація запропонованої концепції потребує глибокої модернізації існуючих СТЕ і

впровадження в ній цілого ряду високотехнологічного обладнання, такого як регульованих установок поздовжньої і поперечної ємнісної компенсації і НЕ. При цьому основна увага приділяється сучасним технологіям FACTS (Flexible alternative current transmission systems – гнучкі системи передачі енергії змінного струму) і розподілених систем синхронізованих вимірювань WAMS (Wide Area Measurement Systems), які застосовуються для покращання інформаційної забезпеченості задач керування режимами СТЕ. У теж час необхідно відзначити, що в даних роботах недостатньо приділяється уваги розвитку методів ситуаційного управління, що забезпечують підвищення ефективності рекуперації енергії.

### **1.5. Постановка проблеми. Обґрунтування мети і формулювання задач наукового дослідження**

1. Рекуперація енергії в системах електрифікованого транспорту є одним з важливих елементів енергозбереження і на сучасній технічній базі дозволяє відновлювати до 10...15 % енергії в магістральному русі поїздів та 30...40 % енергії в циклічному режимі руху «розгін-гальмування».
2. Низький фактичний рівень рекуперації енергії по мережі електрифікованих залізниць, що складає на сьогодні 3...4 % від енергії, витраченої на тягу, вказує на необхідність розвитку технологій підвищення ефективності використання енергії рекуперації.
3. Аналіз проблеми раціонального використання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту показав відсутність єдиного універсального підходу до розв'язання даної проблеми, а використання окремих технологій має обмежену ефективність по ряду технологічних і економічних чинників, що вимагає пошуку більш ефективних методів і засобів, заснованих на сучасних пристроях і алгоритмах управління ними.

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



Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд наступних наукових завдань:

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.

**Матеріали розділу опубліковано в [43, 49-55, 61].**

## РОЗДІЛ 2

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

#### 2.1. Дослідження режимів напруги на струмоприймачах транспортних засобів та у тяговій мережі при рекуперації

Рівень напруги на шинах тягових підстанцій залежить від тягового навантаження, коливань напруги системи зовнішнього електропостачання та суттєво впливає на ефективність рекуперації енергії. Режими тягового електроживлення/рекуперації електротранспорту в свою чергу залежать від багатьох факторів, зокрема необхідної швидкості руху, профіля ділянки колії, маси поїзда та безпосередньо впливають на режими напруги на струмоприймачах, при цьому вони є стаціонарними квазіусталеними випадковими процесами [60, 198-202], розмах, інтенсивність і частота коливань яких здійснює вплив на рівень втрат енергії в елементах електричної тяги. Дослідження імовірнісних характеристик напруги на струмоприймачі і в тяговій мережі при рекуперації дозволяє правильно врахувати її вплив на ефективність рекуперації в різних умовах, а також визначити вплив рівня напруги на шинах ТП на втрати енергії рекуперації в тяговій мережі і її ефективність в цілому.

В роботі було проведено експериментальні дослідження параметрів тягового електроживлення та рекуперації транспортних засобів. Для цього виконані вимірювання режимів напруги на шинах тягових підстанцій і струмоприймачах вантажних електровозів ВЛ11М, приміських електропоїздів ЕПЛ2Т та вагонів метрополітену 81-717(714).5М з відповідним вимірюванням їх тягових струмів. Вимірювання проводилися для ділянок Придніпровської і Львівської залізниць, Дніпровського метрополітену згідно розроблених програм вимірювань, що наведені у Додаток А дисертації. Також використані данні дослідних поїздок електропоїздів ЕПЛ2Т, що отримані тягово-енергетичним вагоном-лабораторією локомотивного депо Дніпро Придніпровської залізниці та експериментальні вимірювання по трамваям ТЗД [29].

В табл. 2.1 наведені основні імовірнісні характеристики процесу тягового електроспоживання для різних систем електротранспорту, що отримані на базі проведених експериментальних вимірювань. Множини реалізацій  $\{P_n(t)\}$ , визначалися як дубуток реалізації напруги на струмоприймачі ЕРС на його тяговий струм.

Таблиця 2.1 – Основні імовірнісні характеристики електроспоживання тягового рухомого складу в різних видах руху

Види транспортних засобів	$m_p$ , МВт	$\sigma_p$ , МВт	$Mo_p$ , МВт	$Me_p$ , МВт	$As_p$ , від. од.	$Ex_p$ , від. од.
Вантажні електровози	0,78	0,465	0,165	0,8	0,17	-1,07
Приміські електропоїзди	0,409	0,307	0,26	0,472	-0,01	-1,38
Міський транспорт (трамваї)	0,174	0,095	0,45	0,654	0,563	-1,23
Метрополітен	0,371	0,216	0,27	0,352	0,28	-1,85

Розподіл імовірності тягового електроспоживання в діапазоні  $P > 0$  має два виражені максимуми в області малих і середніх навантажень (рис. 2.1) що є характерним для всіх видів електричного транспорту. Це свідчить про недовикористання в експлуатації встановленої потужності тягового рухомого складу в наслідок його надлишкової потужності і його роботу в області понижених значень ККД.

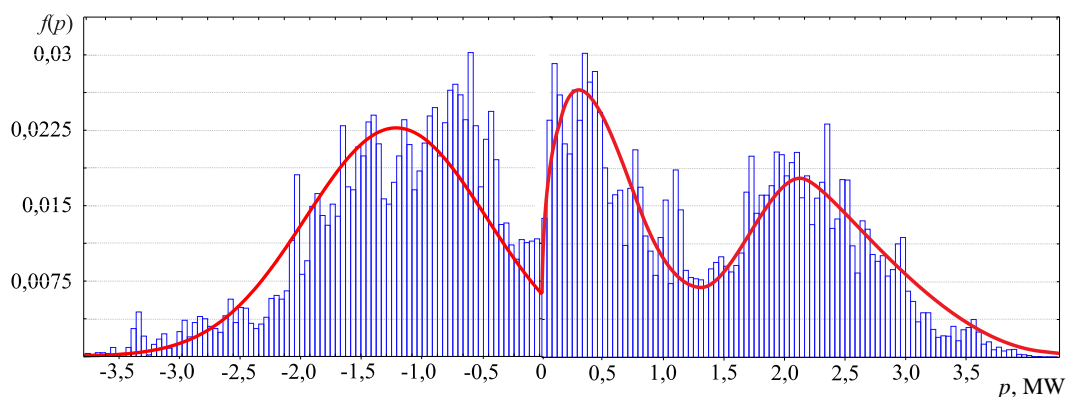


Рисунок 2.1 – Розподіл імовірності потужності що реалізується відповідно в режимах тяги та рекуперації вантажних електровозів

Кореляційні функції процесу  $P(t)$  всіх видів електротранспорту мають незагасаючий коливальний характер (рис. 2.2), що властиво неергодичним випадковим процесам і пов'язано з наявністю в них схованої періодичності [203].

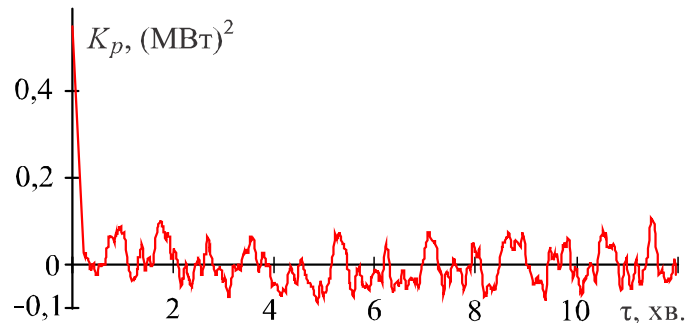


Рисунок 2.2 – Кореляційна функція тягового електроспоживання приміських електропоїздів ЕПЛ2Т

Визначення періодичних коливань у процесі тягового електроспоживання може бути виконано на основі застосування перетворення Фур'є не до самого випадкового процесу  $P(t)$ , а до незагасаючої частини його кореляційної функції  $K_p(\tau)$  на інтервалі  $\tau \in (\tau_k, T/5)$  (де  $\tau_k$  – час кореляції,  $T$  – тривалість електроспоживання), що дозволяє відфільтрувати періодичні коливання від власне випадкового процесу [163]. Спектри функцій  $K_p(\tau)$  (рис. 2.3) є прорідженими в порівнянні зі спектрами миттєвих графіків  $P(t)$  (рис. 2.4) оскільки вільні від випадкової складової та вміщують у собі лише періодичні низькочастотні коливання процесу  $P(t)$ .

Діапазон частот спектрів  $P(t)$  і  $K_p(\tau)$  в квазіусталених режимах електроспоживання транспортних засобів складає 0,001...1,5 Гц, а при регулюванні їх потужності – 0,1...10 Гц. Енергія періодичних коливань електроспоживання вантажних і пасажирських електровозів в квазіусталених режимах становить близько 15 % від усієї енергії випадкового процесу  $P(t)$  та сягає 25 % для приміських електропоїздів, міського електротранспорту та метрополітенів, що пов'язано з більш коливальним характером електроспоживання. Це необхідно

враховувати при розробці заходів по зменшенню втрат в елементах відповідних системи електричної тяги.

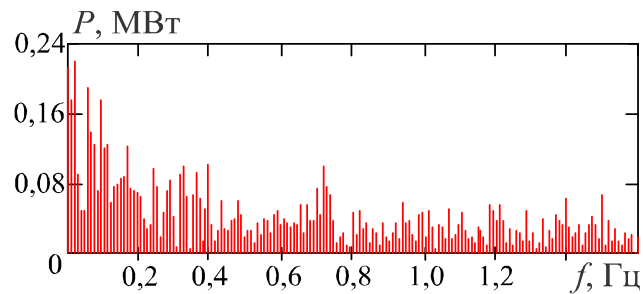


Рисунок 2.3 – Амплітудний спектр тягового електропоживання  $P(t)$  приміських електропоїздів ЕПЛ2Т

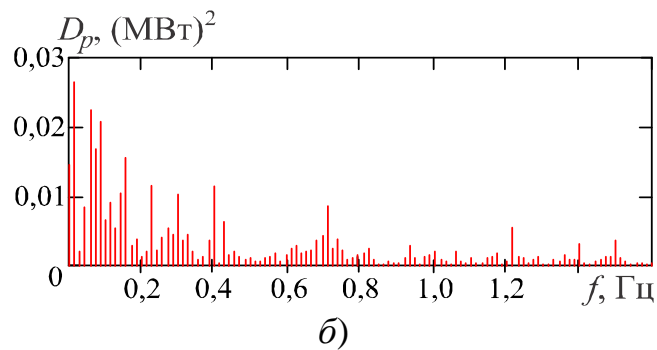
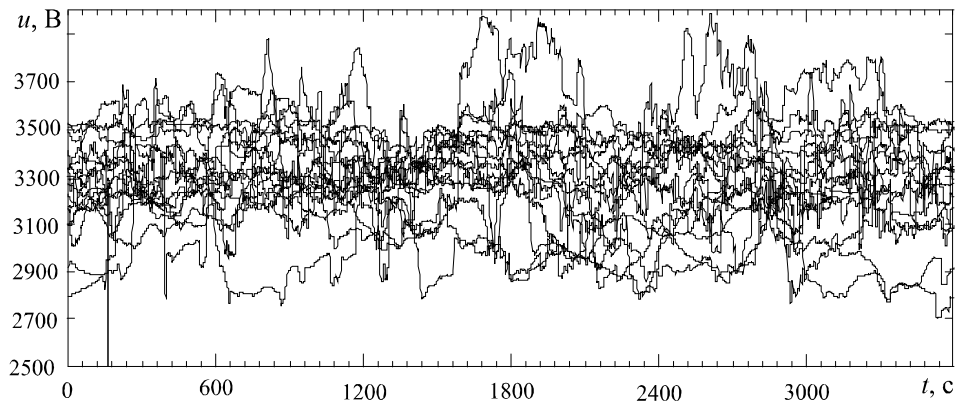


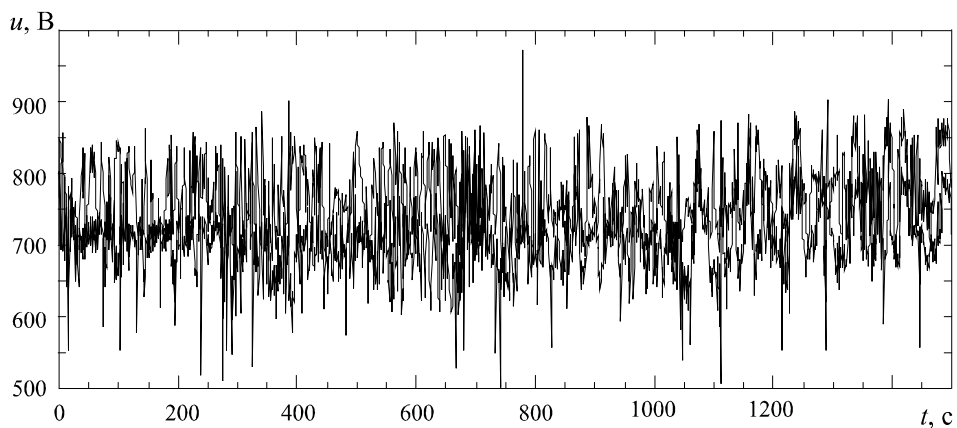
Рисунок 2.4 – Амплітудний спектр кореляційної функції  $K_p(\tau)$  електропоживання

Інформація про діапазон та розмах періодичних коливань у випадковому процесі рекуперації і тягового електропоживання дозволяють прогнозувати кількість циклів заряду-розряду накопичувачів енергії, що необхідно враховувати при оцінці зниження реверсу накопичувача в процесі експлуатації.

Режими тягового електропоживання формують в тому числі напругу на струмоприймачах ЕРС та впливають на роботу іншого ЕРС, що знаходиться на відповідній або суміжній фідерних зонах. На рис. 2.5 наведено множину реалізацій напруги на струмоприймачах вантажних електровозів ВЛ8 та трамваїв ТЗД.



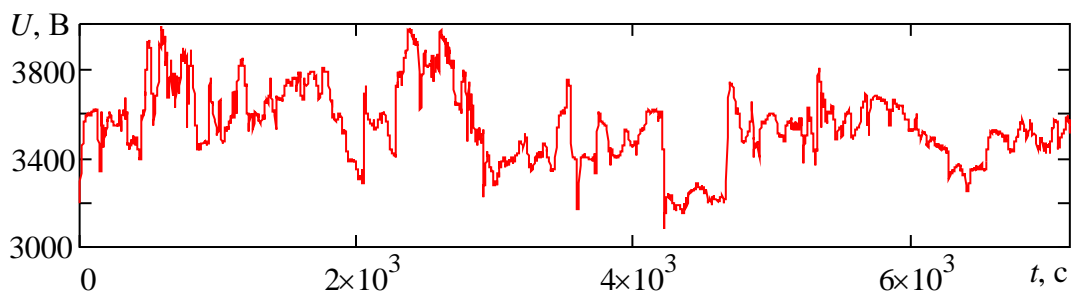
а)



б)

Рисунок 2.5 – Сімейство реалізацій напруги на струмоприймачі вантажних електричних ВЛ8 (а) та трамваїв ТЗД [27]

На рис. 2.6 наведено суміщену реалізацію режиму рекуперації для дослідного електричного ВЛ8 при роботі на ділянках Придніпровської залізниці. Данні залежності отримані на ділянках з інтенсивним рухом, тому зривів рекуперації на них не зафіксовано, але має місце зростання напруги практично до граничних значень.



а)

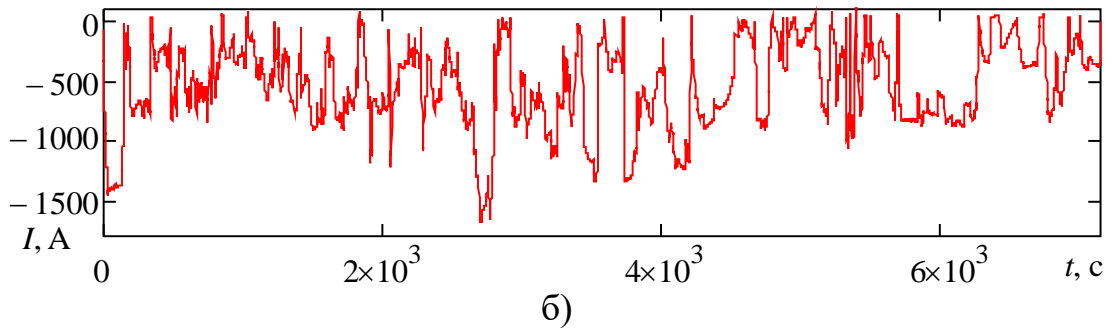


Рисунок 2.6 – Реалізація напруги на струмоприймачі (а) і тягового струму (б) електровозу ВЛ8 в режимі рекуперації

На рис. 2.7 приведені реалізації напруги і струму приміського електропоїзда постійного струму ЕПЛ2Т, з яких видно вплив тягового електроспоживання і режимів рекуперації на рівень напруги на струмоприймачі ЕРС, а також наведено випадки зривів процесу рекуперативного гальмування.

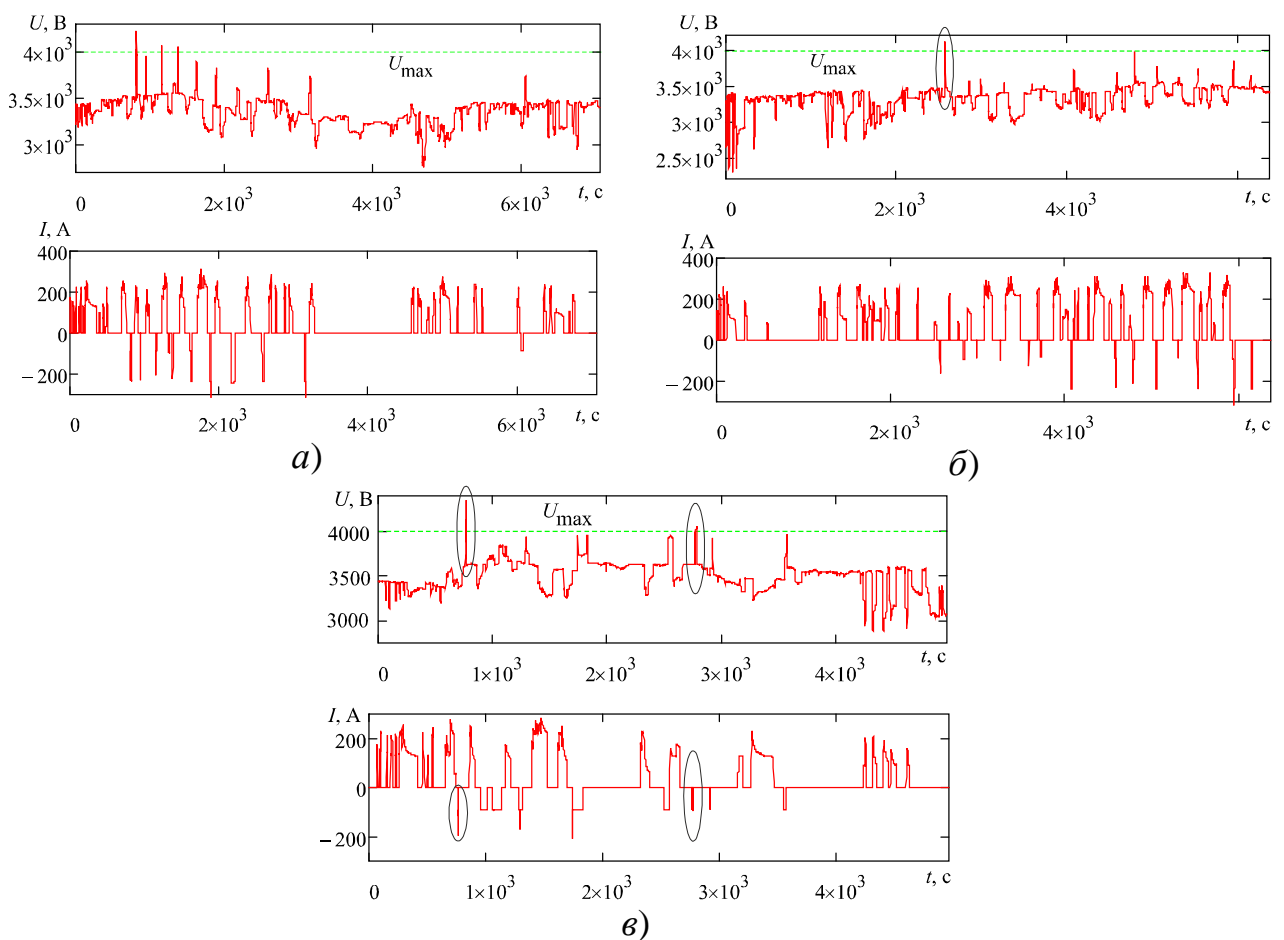


Рисунок 2.7 – Часові діаграми напруги на струмоприймачі (а) та тягового струму (б) електропоїздів постійного струму ЕПЛ2Т

З рис. 2.7 можна спостерігати періодичні відключення рекуперативного гальмування поїзда за максимально допустимою напругою на струмоприймачі (4,0 кВ) і порушенням умови (1.8), що пояснюється відсутністю в моменти рекуперації тягового електроживлення на ділянці. У деяких випадках при включенні рекуперації напруга на струмоприймачі електропоїзда встигала сягати значення 4,5 кВ, що можна пояснити низькою швидкістю захисту по максимальній напрузі на ЕРС. Це становить небезпеку для силових кіл самого електропоїзда та інших поїздів, які знаходяться в безпосередній близькості і в експлуатації часто викликає пошкодження обладнання ЕРС [204]. Крім цього ефективність режимів рекуперації істотно залежить від рівня напруги на шинах тягових підстанцій.

Реалізації зміни напруги на струмоприймачах вантажних електровозів і трамваїв та відповідних їм тягових струмів наведено на рис. 2.8.

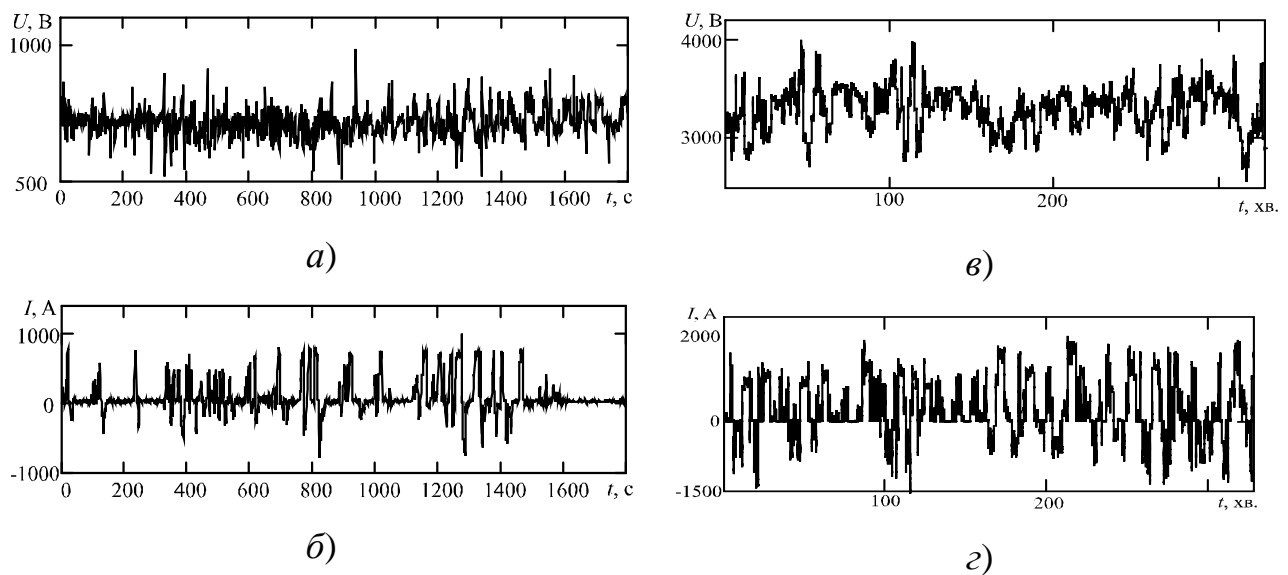


Рисунок 2.8 – Графіки зміни в часі напруги (а) та струму (б) трамваю ТЗД, а також напруги (в) та струму (г) електровозу ВЛ8 в режимах тяги і рекуперації

Оскільки зміна напруги на струмоприймачі має стохастичний характер, то її аналіз і врахування повинно проводитися імовірно-статистичними методами, а, отже, для практичних розрахунків потрібні імовірнісні характеристики



зміни напруги. З одного боку, розглядаючи реалізацію  $U(t)$  окремо, її миттєві значення можна аналізувати згідно теорії випадкових величин, а при розгляді множини реалізацій необхідно застосування теорії випадкових функцій.

Особливе значення набуває знання моментних функцій математичного очікування  $m_U(t)$ , дисперсії  $\sigma_U^2(t)$  і особливо кореляційної функцій  $K_U(\tau)$ . Знаючи, наприклад, величину напруги в один момент часу, за відомою кореляційною функцією можна судити в яких межах буде знаходитися напруга в інший момент часу. Для стаціонарних випадкових функцій кореляційна функція не залежить від положення в часі двох аргументів  $t_n$  и  $t_{n+1}$  випадкової функції, а лише залежить від проміжку часу  $\tau = t_{n+1} - t_n$  між ними. Тоді кореляційна функція є функцією тільки одного аргументу – проміжку між першим і другим часовими аргументами випадкової функції:

$$K[U(t_1, t_1 + \tau)] = K[U(t_2, t_2 + \tau)] = K[U(\tau)]. \quad (2.1)$$

Частота вимірювань на вантажних електровозах, приміських електропоїздах та метрополітені становила 2 та 1 кГц відповідно, що є достатньою для відслідковування електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів в тягових колах ЕРС, але для аналізу макроенергетичних показників ефективності процесу рекуперації данні реалізації оброблювалася з часовим інтервалом дискретизації  $\Delta t$ , знайденим згідно з теоремою Котельникова

$$\Delta t = 0,5/f_B, \quad (2.2)$$

де  $f_B$  – максимальна (верхня) частота спектру досліджуваних функцій  $U(t)$  та  $I(t)$ , що дорівнює  $(1/2 \dots 1/3)$ ,  $s^{-1}$ , згідно якій крок квантування склав 1 с, що дозволяє використовувати при аналізі реалізації режимів напруг і тягових струмів для електротроїздів і трамваїв отриманих з частотою 1 Гц.

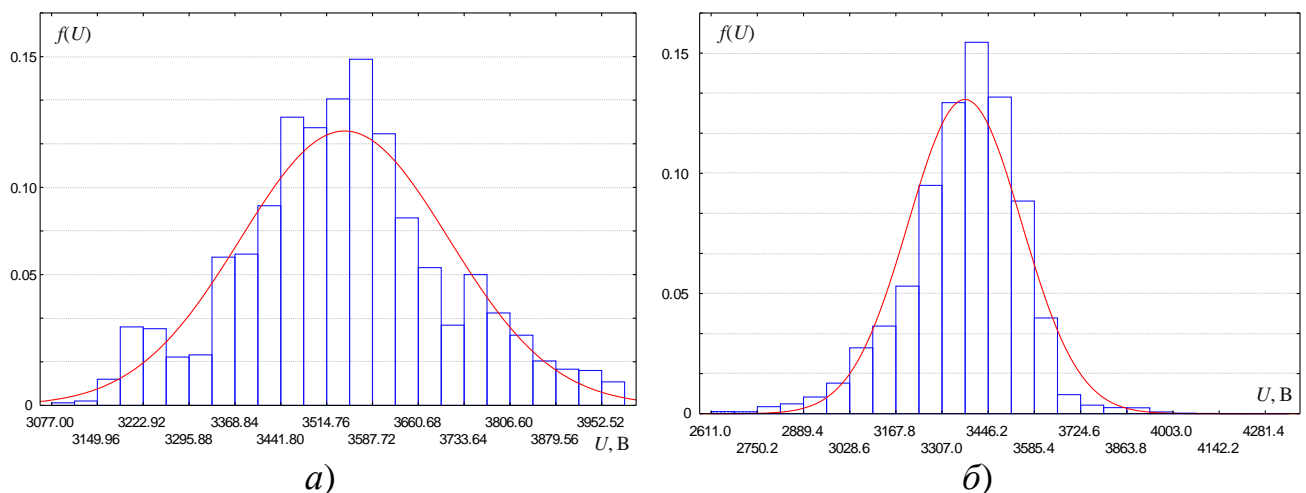
В табл. 2.2 наведені основні імовірнісні характеристики режиму напруги на струмоприймачах транспортних засобів постійного струму в різних видах руху при рекуперації електроенергії.

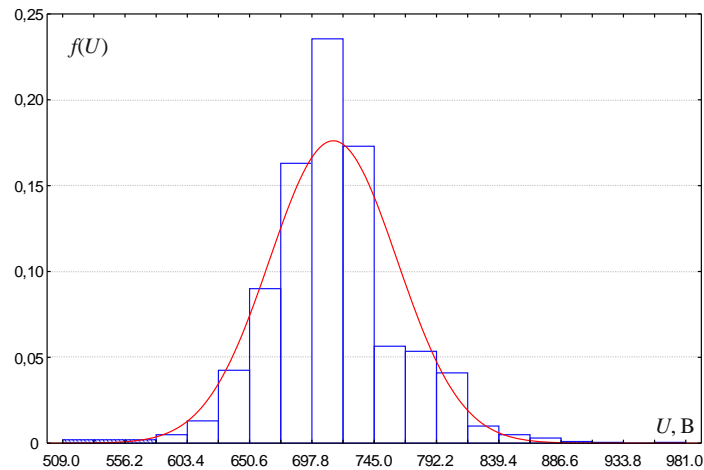
Таблиця 2.2. – Імовірнісні характеристики напруги на струмоприймачі

Вид транспортних засобів		Параметри					
		$m_u$ , В	$\sigma_u$ , В	$Mo_u$ , В	$Me_u$ , В	$As_u$ , відн.од.	$Ex_u$ , відн.од.
Електровози	ВЛ8	3682	286	3589	3756	0,34	1,31
	ДЕ1	3662	217	3263	3267	-0,18	1,1
	ВЛ11М	3615	256	3378	3427	-0,25	1,3
Електропоїзди ЕПЛ2Т		3769	364	3697	3582	-0,25	0,96
Трамвай Т-3Д		782	68	752	746	0,16	-1,87

Як випливає з вищесказаного, напруга на струмоприймачі ЕРС  $U(t)$  характеризується значними безперервними коливаннями в часі (рис. 2.5-2.8). У загальному випадку вона є випадковим процесом.

Аналіз представлених характеристик, а також статистичні розподіли (гістограми), які представлені на рис. 2.9 показують, що, згідно загальній вибірці значень, випадкова величина напруги на струмоприймачі різних видів ЕРС постійного струму (з імовірністю  $p = 0,15$  згідно критерію  $\chi^2$  Пірсона) в режимі рекуперації розподіляється по нормальному закону з параметрами, наведеними в табл. 2.2.





в)

Рисунок 2.9 – Гістограми (1) і теоретичні закони розподілу (2) загальної повної вибірки значень напруги на струмоприймачах вантажних електровозів (а), електропоїздів (б) і трамваїв (в)

Аналіз гістограм і реалізацій  $U(t)$  вантажних електровозів в режимі рекуперації свідчить, що при номінальній нарузі на струмоприймачі в тяговому режимі 3000 В фактичні його значення змінюються в широкому діапазоні 3560...3950 В, а для електропоїздів мають випадки несвоєчасного спрацювання захисту при рекуперації.

При рекуперації напруга на струмоприймачах електропоїздів встигає перевищувати гранично допустиме значення 4000 В в наслідок інерційності спрацювання реле максимальної напруги. Напруга на струмоприймачах трамваїв коливається в межах 510...980 В при номінальній нарузі в мережі 550 В. Порівняно з напругою на струмоприймачах електровозів і електропоїздів напруга на струмоприймачах трамваїв має більш коливальний характер. Це пояснюється тим, що весь період роботи електровоз з поїздом є значно інерційною системою, швидкість його руху при управлінні змінюється повільніше, ніж у трамваїв, а, відповідно, більш плавно змінюються і споживані струми і напруга на струмоприймачі. У трамваїв ж часті прискорення й уповільнення – розгони і гальмування, що необхідні на коротких ділянках між зупинками викликають значні різкозмінні режими електроспоживання/рекуперації. Крім

цього, режим управління в умовах міського руху робить трамвайне навантаження для тягової мережі більш динамічним і різкозмінним. Тоді і частоти коливань напруги і струму трамваїв будуть на порядок вище, ніж у електровозів. Зазначимо, що у тролейбусів в умовах ускладненого хаотичного руху автотранспорту, тягове навантаження ще більш динамічне.

Однорідний характер коливань величини  $U(t)$  (рис. 2.4-2.7), а також слабозмінне в часі математичне очікування  $m_U(t)$  (рис. 2.11) і дисперсія  $D_U(t)$  дають підставу вважати напругу  $U(t)$  на струмоприймачі ЕРС постійного струму стаціонарним випадковим процесом. Одночасно, вид гістограм для перерізів (рис. 2.12), незначні величини коефіцієнтів асиметрії і ексцесу (табл. 2.2), а також величина ймовірності  $\sim p = 0,14$  за критерієм Пірсона дозволяють вважати, що одновимірним (в перерізі  $t_n$ ) розподілом напруги  $f(U, t_n)$  є закон Гауса з параметрами, наведеними табл. 2.3.

Таблиця 2.3. – Імовірнісні функції одновимірного розподілу напруги на струмоприймачах ЕРС постійного струму

Параметри		$m_U(t)$ , В	$D_U(t)$ , В <sup>2</sup>	$\sigma_U(t)$ , В	$As$ , відн. од.	$Ex$ , відн. од.
Електровози	ВЛ8	3288	44940	212	-0,28	0,01
	ВЛ11	3262	47090	217	-0,18	1,1

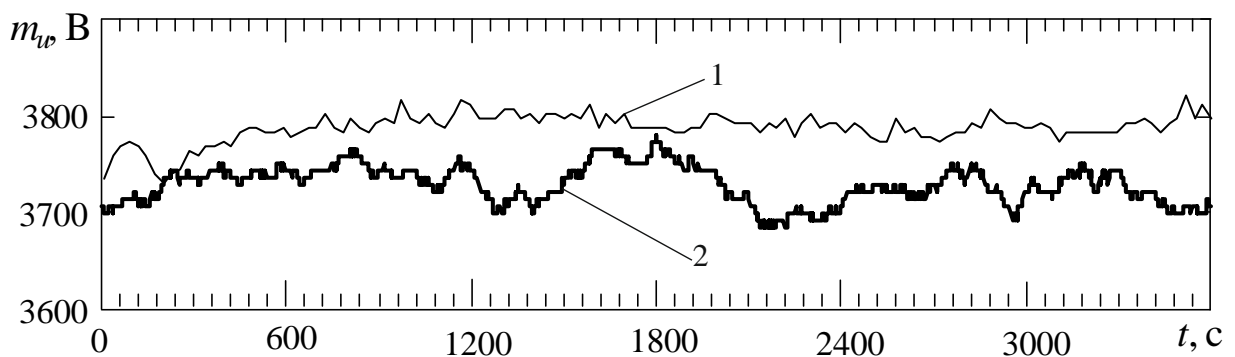


Рисунок 2.10 – Функції математичних сподівань випадкових процесів напруги на струмоприймачах електровозів (крива 1) і електропоїздів (крива 2)

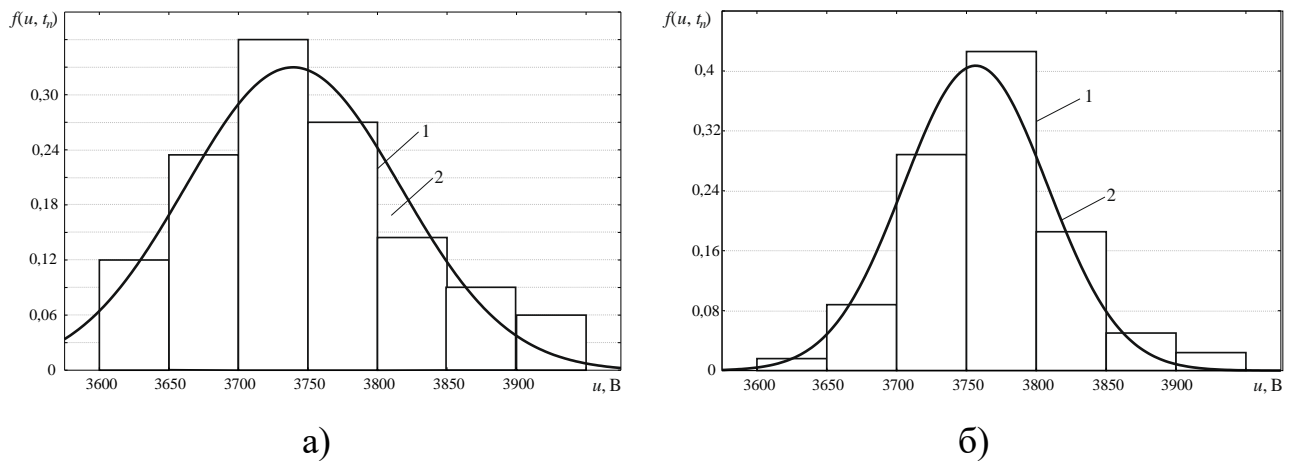
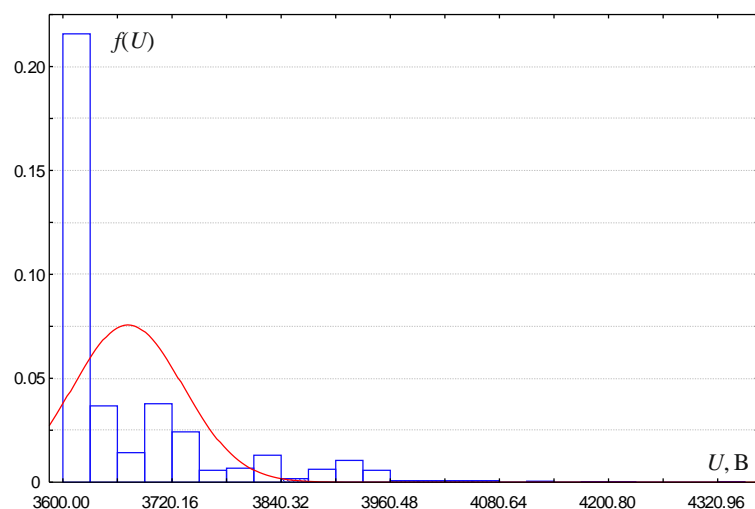
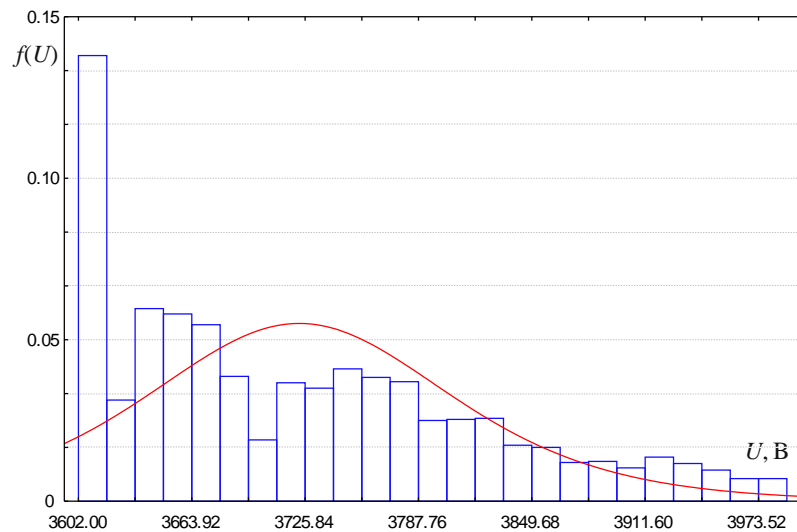


Рисунок 2.11 – Статистичні (1) і теоретичні (2) одномірні (в перерізі) розподіли випадкових функцій напруги на струмоприймачах вантажних електро-возів (а) і електропоїздів (б)

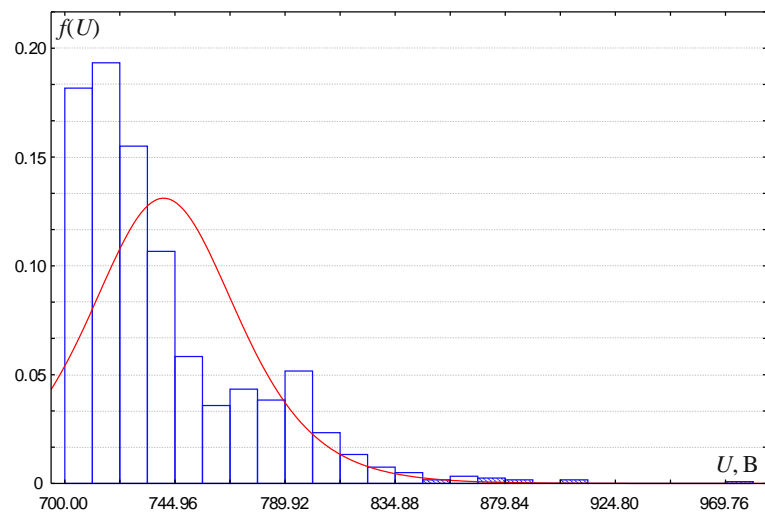
Як правило в СТЕ залізниць постійного струму напруга на шинах ТП не перевищує 3600 В, а в лініях міського електротранспорту 750 В, тому при на-прузі на струмоприймачах ЕРС вище даної межі можна вважати що на ділянці присутній режим рекуперації енергії або іншого ЕРС, або власне розглядува-ного. В роботі було досліджено розподіл напруги на струмоприймачі в верх-ньому діапазоні її допустимих значень, що для електровозів, електропоїздів і трамваїв наведено на рис. 2.12. Як видно з гістограм, розподіл напруги в тако-му режимі вже не відповідає нормальному закону.



а)



б)



в)

Рисунок 2.12 – Статистичні розподіли напруги на струмоприймачах ЕРС в режимі рекуперації: а – електропоїзди; б – вантажні електровози; в – трамваї

Статистичний розподіл струмів рекуперації вантажних електровозів ВЛ8 наведено на рис. 2.13, де має місце також два явно виражених максимуми, що сконцентровані в області малих і середніх струмів, що відповідає незначним обсягам повернення енергії при рекуперативному гальмуванні у порівнянні з номінальною потужністю електричного гальма. Це має місце по-перше в наслідок необхідних режимів гальмування, а по-друге пояснюється тим, що тягова мережа не завжди володіє здатністю до прийому енергії рекуперації.

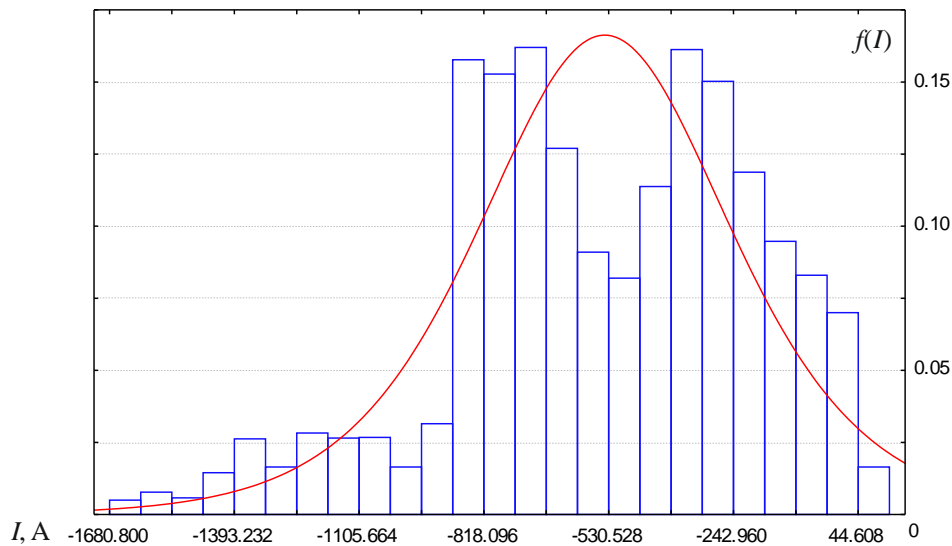


Рисунок 2.13 – Статистичний розподіл струму рекуперації елетровозів ВЛ8

На рис. 2.14 та 2.15 наведено вибіркві результати експериментальних досліджень зміни напруги на шинах двох різних тягових підстанцій 3,3 кВ періодом за одну добу. З порівняння видно що діапазон і характер коливань має суттєву відмінність, що при однаковій потужності ТП пов'язано окрім режимів руху та навантажень на ділянках із режимами системи зовнішнього електропостачання в тих точках, де приєднується ТП.

Режими напруги на шинах 3,3 кВ тягової підстанції впливають як на експлуатаційні характеристики функціонування електрифікованих залізниць, так і на енергетичні характеристики, у тому числі на ефективність застосування рекуперативного гальмування на ділянках.

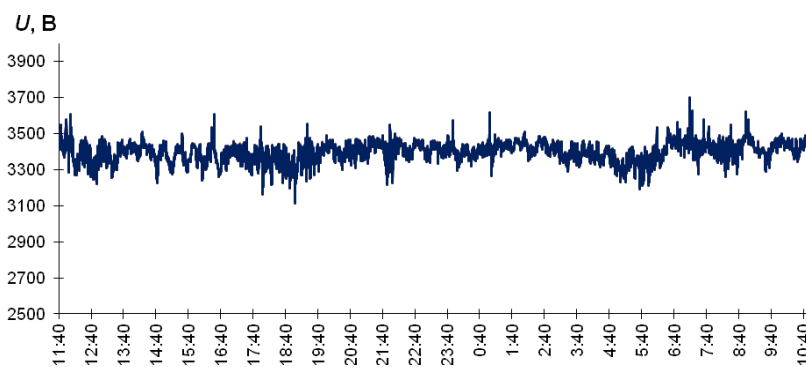


Рисунок 2.14 – Режим напруги на шинах 3,3 кВ ТП 1

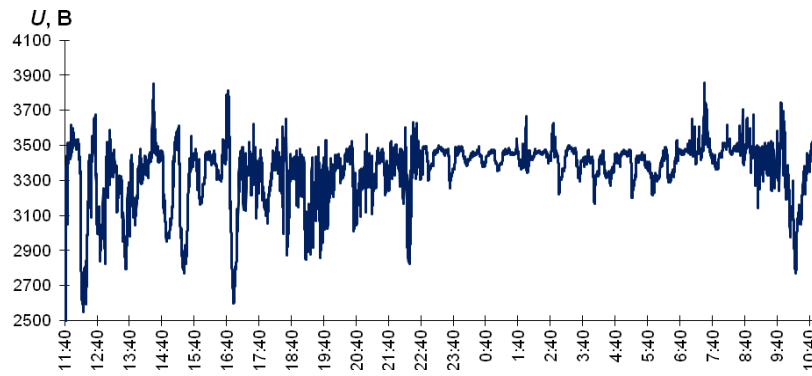


Рисунок 2.15 – Режим напруга на шинах 3,3 кВ ТП 2

На рис. 2.16 наведено теоретичні закони розподілу напруги на шинах 3,3 кВ для чотирьох тягових підстанцій Придніпровської і Львівської залізниці, з аналізу яких можна зробити висновок, що значення напруги на шинах дослідних тягових підстанцій мають широкий розкид, де максимумами розподілів відповідають значенню напруги холостого ходу на шинах ТП. Числові характеристики режиму напруги в різних режимах роботи тягових підстанцій приведені в табл. 2.4, з аналізу якої видно, що при майже однакових математичних очікуваннях напруги на шинах ТП їх дисперсії можуть відрізнятися на порядок, що також свідчить про значну відмінність у розкиді значень напруги і характер її коливань. Отже на шинах 3,3 кВ напруга має різкозмінний характер, а її максимальні коливання сягають 1400 В.

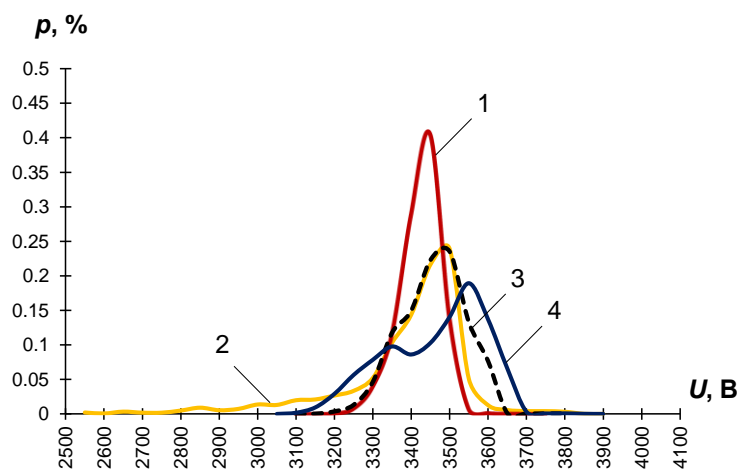


Рисунок 2.16 – Емпіричні розподіли напруги на шинах 3,3 кВ чотирьох досліджуваних тягових підстанцій



Таблиця 2.4 – Числові характеристики режиму напруги на шинах ТП 3,3 кВ

№ ТП	Показник					
	$M(U)$	$D(U)$	$As(U)$	$Ex(U)$	$\min(U)$	$\max(U)$
ТП1	3421	2637	-0,85	0,87	3113	3700
ТП2	3493	7549	1,89	2,58	2550	3800
ТП3	3491	5147	1,36	-0,86	3100	3650
ТП4	3451	21324	-1,61	3,94	3050	3700

## 2.2. Дослідження впливу режимів систем зовнішнього електропостачання на ефективність рекуперації на ділянках з інвертуючими ТП

Режим рекуперації в системі електричної тяги супроводжується збільшенням напруги на струмоприймачі рекуперативного поїзда і в тяговій мережі, що особливо проявляється в умовах обмеженого тягового електроспоживання в зоні рекуперації. При наявності інверторів на ТП постійного струму режим напруги в тяговій мережі може бути поліпшено за рахунок передачі енергії гальмування в мережу середньої (високої) напруги за умови, що її прийом узгоджений як в технічному так і комерційному аспектах, таких як:

- максимально допустима короткочасна потужність, що приймається мережею;
- прийнятні гармоніки;
- готовність обленерго до рефінансування.

Використання інверторних перетворювачів на електрифікованому транспорті постійного струму поширено лише на деяких гірських ділянках Львівської залізниці з затяжними ухілами (до 30 %), що дозволяє споживати надлишкову енергію рекуперації поїздів системою зовнішнього електропостачання. Дані ТП постійного струму з інверторами забезпечують передачу надлишкової рекуперативної енергії поїздів з тягової мережі постійного струму 3,3 кВ до живлячої мережі змінного струму через приєднання 35 (110) кВ. Оскільки ці ділянки рекуперації є протяжними (10...12 км), то при існуючих швидкостях руху поїздів режими рекуперації на них є достатньо тривалими і робота інверторів на ТП може вважатись усталеною. Вмикання інверторів відбувається коли напруга на шинах

ТП сягає відповідного значення уставки, що для ТП досліджуваних ділянок складає 3550...3600 В.

Для аналізу ефективності роботи інверторних перетворювачів ТП постійного струму на Львівській залізниці були проведені синхронізовані вимірювання параметрів енергії рекуперації одночасно на двох суміжних ТП і рухомому по ділянці між ними поїзді в режимі рекуперації (інших споживачів на дослідній ділянці не було) [49]. Для дослідження була обрана двоколійна міжпідстанційна зона Скотарське – Воловець, де в напрямку ст. Воловець на ділянці ухил (спуск) сягає 28,4 ‰ і з метою обмеження швидкості поїздів є обов'язковим для використання електричного гальмування. При виконанні вимірювань на ТП застосовані аналізатори якості електроенергії EDL-175, PNA-296. Для вимірювань в силових колах електровозу постійного струму були використані вимірювальні комплекти з оптичною та радіо-канальною розв'язками на базі мікроконтролерів ATxmega128A3, ATmega128RFA1 та оптичних прийомо-передавачів HFBR-2521 / HFBR-1521 [96]. Загальна схема проведення вимірювань приведена в Додатку А.

До проведення основного експерименту виконані вимірювання на ділянці Клепарів – Стрий – Ходорів та у зворотному напрямку. Дана ділянка особлива консольним живленням тягової мережі у одноколійному напрямку ст. Ходорів, при русі якою спостерігались зниження напруги нижче 3,0 кВ. Для цього випадку зафіксоване значення напруги величиною 2727 В при загальному струмі електровозу 506 А. Результати вимірювань параметрів електроспоживання (напруги на струмоприймачі і струму в режимах тяги, вибігу і рекуперації) електровоза ВЛ11М на дослідних ділянках приведені на рис. 2.17, 2.18.

Попередній аналіз отриманих результатів показав, що для нормально встановленої схеми живлення режим напруги в тяговій мережі відповідав встановленим вимогам. Мінімальне значення напруги для двосторонньої схеми складало 2770 В у режимі тяги при загальному струмі електровозу 1220 А. Найвище значення напруги на струмоприймачі зафіксоване в режимі рекуперації, яке складає 3950 при загальному струмі рекуперації електровозу 760 А і при якому вимикався режим рекуперації.

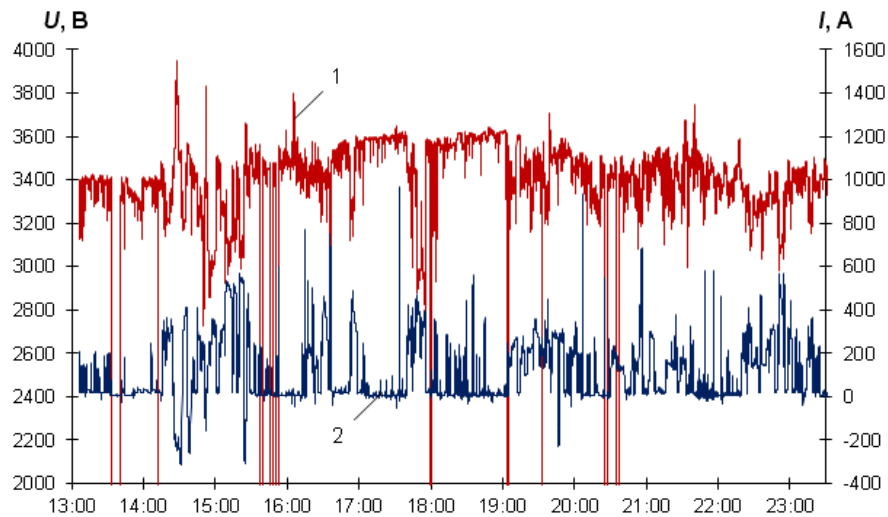


Рисунок 2.17 – Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М в напрямку Клепарів – Стрий – Ходорів: 1 – напруга на струмоприймачі; 2 –тяговий струм (рекуперація при  $I < 0$ )

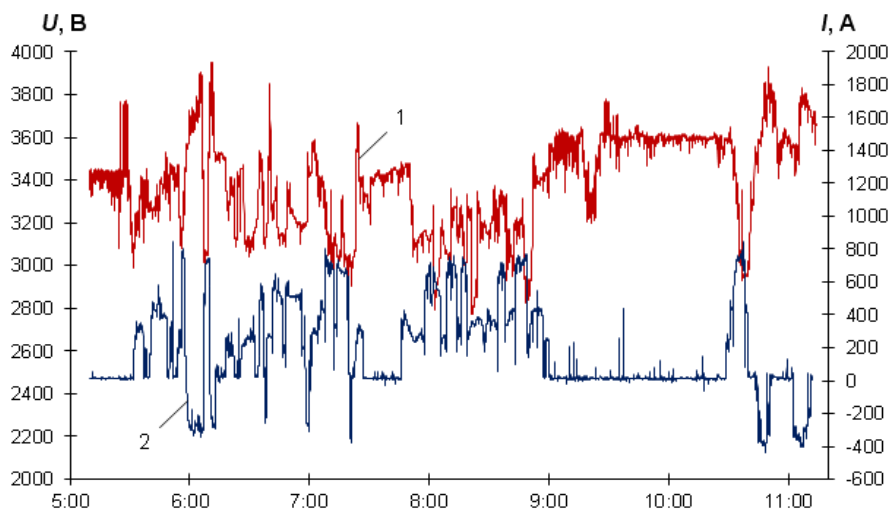


Рисунок 2.18 – Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М на ділянці Клепарів – Стрий – Воловець: 1 – напруга; 2 – струм (рекуперація при  $I < 0$ )

На рис. 2.19 в одній часовій системі координат наведено фрагмент запису параметрів режиму тяги і рекуперації електровозу ВЛ11М при проходженні дослідної ділянки, що зіставляються з режимом роботи тягових підстанцій, між якими рухався дослідний електровоз. При цьому фіксувалися потужності двох суміжних ТП по стороні змінного струму (на вводах 35 кВ тягових трансформаторів), які характерно відображають перехід перетворювачів ТП з випрямного в інверторний режим, а також зіставляються лінійні напруги на вводах ТП 10 і 35 кВ.

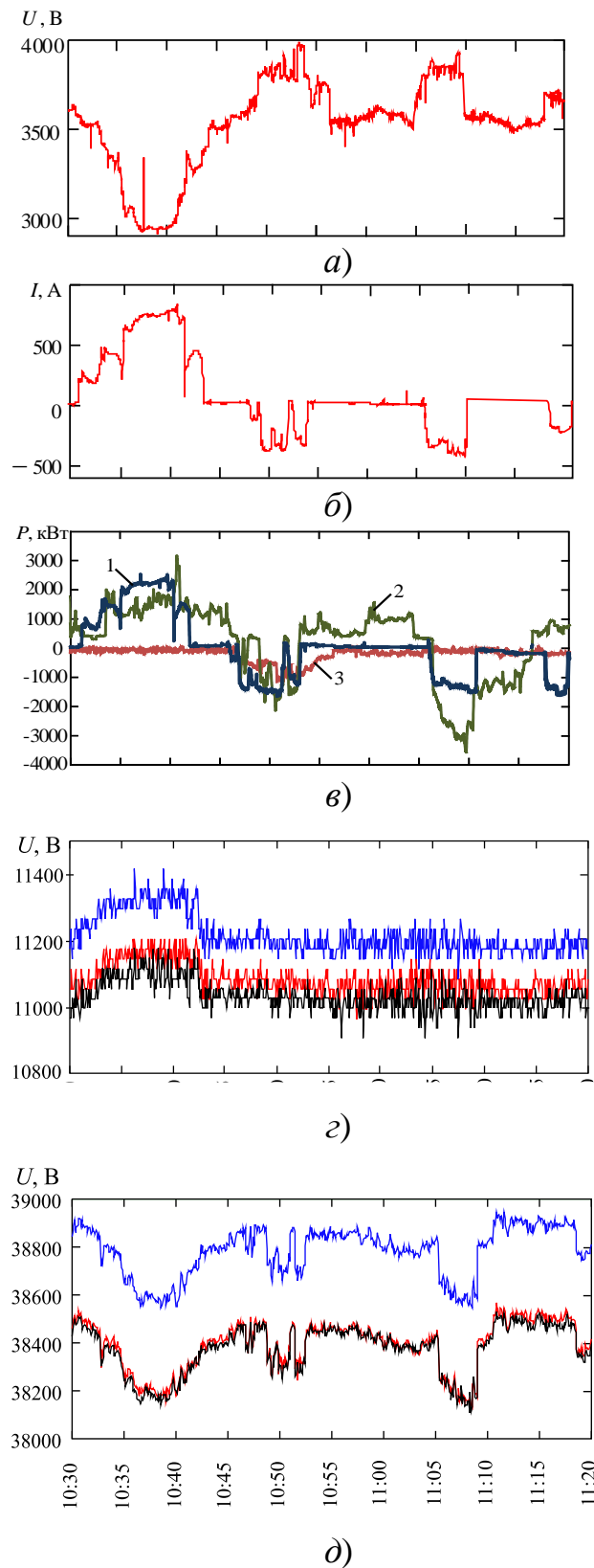


Рисунок 2.19 – Аналіз впливу режиму роботи електровоза на режим ТП: *а, б* – відповідно напруга на струмоприймачі і струм ЕРС; *в* – потужності ЕРС і ТП (1 – ЕРС; 2 – ТП Воловець; 3 – ТП Скотарське); *г, д* – відповідно лінійні напруги на вводах ТП Скотарське (10 кВ) і Воловець (35 кВ)

При проходженні поїзда в режимі рекуперації між ТП на їх приєднань не зафіксовано значних порушень вимог щодо рівня напруги. Максимальне значення потужності, яка генерувалась зі сторони тягового навантаження, зафіксована на рівні 1100 кВт для однієї підстанції і на рівні 3000 кВт для іншої. В інверторному режимі роботи тягової підстанції спостерігалось загальне підвищення коефіцієнта сумарних гармонійних спотворень, що є технологічною особливістю роботи тиристорного інвертора. В табл. 2. наведені значення основних показників якості енергії рекуперації, виміряні зі сторони живлячої мережі 35 кВ [206].

Таблиця 2.5 – Основні показники якості електроенергії в режимі рекуперації

Показники по напрузі	Значення	Показники по струму	Значення
Відхилення, %	9,38	Гармонійні спотворення, %	20,8
Гармонійні спотворення, %	3,8	в т.ч. непарними, %	20,7
в т.ч. непарними, %	3,1	парними, %	1,8
парними, %	0,3	інтергармоніками, %	0,6
інтергармоніками, %	0,2	Коефіцієнт амплітуди	1,55
Несиметрія, %	0,5	Коефіцієнт форми	1,09
Частота, Гц	50,0	Несиметрія, %	1,39

Аналіз реєстрограм потужності суміжних ТП (рис. 2.19, в) і положення рекуперативного поїзда між ними свідчить про нерівномірний розподіл потужності рекуперації по відповідним ТП. Зокрема спостерігалася передача 75...80 % енергії рекуперації через віддалену ТП, що знаходилася на відстані до електровоза близько 90 % довжини міжпідстанційної зони (проміжок часу 10:45...10:55). В такому разі вплив на режими роботи інвертуючих ТП може здійснювати живляча мережа, тобто її режим напруги (завантаження). Також зафіксовано, що на даних ділянках при рекуперації на струмоприймачі електровоза напруга сягала значення (3,95 кВ), при якому відбувалося порушення режиму рекуперації. В даному випадку це приводило до вимикання однієї секції електровозу з режиму рекуперації.

Крім того, в деяких випадках було зафіксовано, що сумарна потужність рекуперації на вводах суміжних ТП перевищувала потужність рекуперації по-

їзда (рис. 2.19, проміжок часу 11:05...11:15). Оскільки за технічними умовами проведення вимірів на досліджуваній ділянці інших поїздів графіком руху не передбачалося і рекуперація застосовувалась лише на одному електровозі, дане явище може пояснюватися лише перетоками енергії по тяговій мережі від сусідніх ТП (працюючих у випрямному режимі), що знаходилися за межами дослідної ділянки.

На рис. 2.20-2.22 приведені осцилограми, які характеризують роботу ТП в інверторному режимі. Форми фазних напруг трифазної системи 35 кВ мають характерні спотворення, спричинені перехідними процесами при комутації тиристорів при переходах між фазами інвертора.

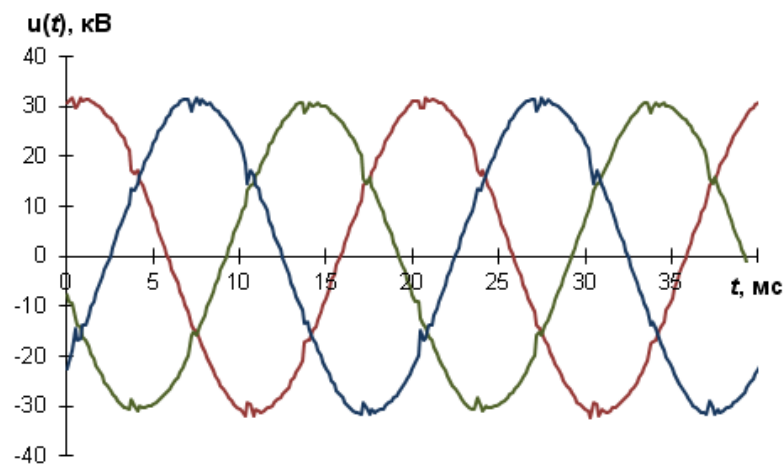


Рисунок 2.20 – Осцилограми фазних напруг в мережі 35 кВ

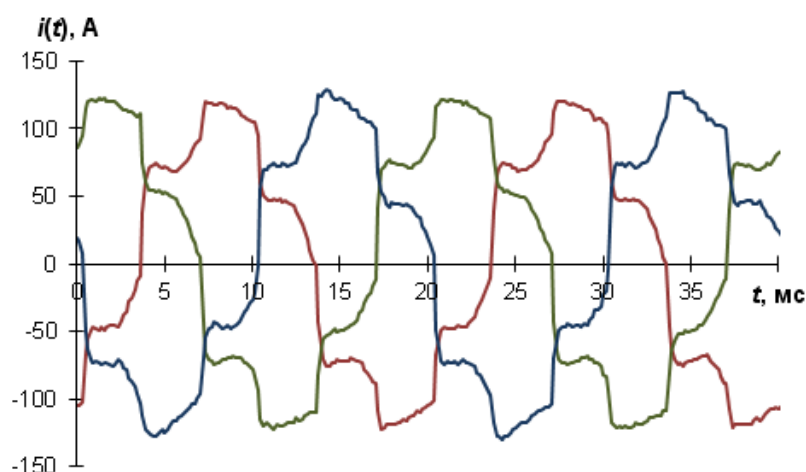
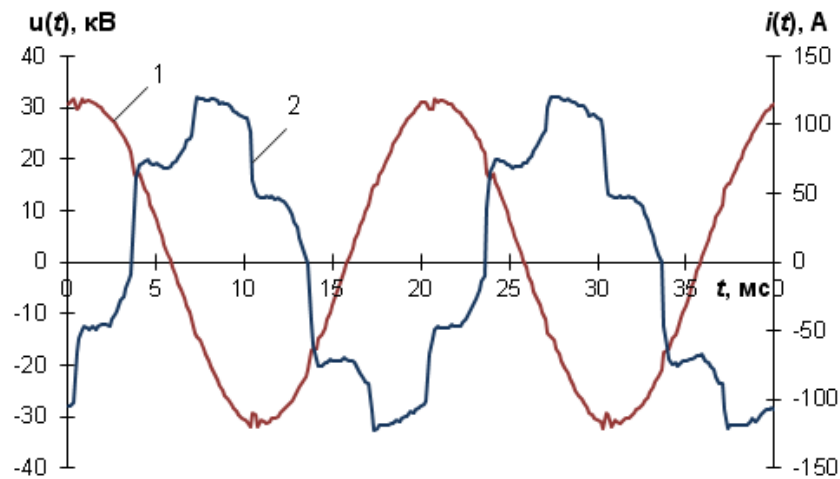


Рисунок 2.21 – Осцилограми фазних струмів в мережі 35 кВ



Рисунк 2.22 – Осцилограмми напруги і струму в одній фазі мережі 35 кВ:

1 – напруга; 2 – струм

Первинні струми трифазного інвертора мають несиметричну форму, що наближається до ступінчастої 6-пульсного перетворювача. Симетрія між струмами різних фаз в цілому дотримується і не перевищує 1,4 %. Кут навантаження в інверторному режимі зафіксовано на рівні  $-131,9^\circ$ , що вказує на перетікання реактивної потужності через нестачу  $48,1^\circ$  до повного протифазного режиму між струмом і напругою.

Як видно з рис. 2.19, д при роботі ТП в режимі видачі потужності в живлячу мережу спостерігається не підвищення напруги на вводі 35 кВ а її зниження. Інвертор, що перетворює електроенергію рекуперації з мережі постійного струму відноситься до категорії ведених мережею і за рахунок низького коефіцієнту потужності споживає достатньо високе значення реактивної потужності. При рекуперації електроенергії на мережу зовнішнього електропостачання змінного струму активна енергія генерується в мережу, а реактивна енергія, споживається з неї так само як і при роботі ТП в режимі тяги поїздів, але навіть перевищує її.

Аналогічні процеси відбуваються при рекуперації в системі тяги змінного струму, лише з тією відмінністю що інвертор розташовується на самому електровозі, коли при вмиканні рекуперативного гальмування на струмоприймачі електровоза знижується напруга за рахунок реактивної втрати напруги в тяговій мережі. Тому вважається що в системі тяги змінного струму відсутні проблеми з

граничнодопустимою напругою в режимі рекуперації [205] та споживанням енергії при відсутності тягового навантаження на ділянках, але використання сучасних чотириквadrантних перетворювачів на базі IGBT на EPC і ТП дозволяють як споживати так і генерувати електроенергії з максимальним значенням коефіцієнта потужності при майже відсутній реактивній потужності, тому приходимо також до проблеми підвищення напруги.

Важливим фактором при переключенні ТП на режим інвертування є селективність спрацювання, тобто можливість розрізняти підвищення напруги в тяговій мережі при рекуперації від комутаційних стрибків напруги, наприклад при вимкненні тяги. Для виключення транзитних перетікань енергії між тяговими підстанціями при розкиді між значеннями напруг на шинах суміжних ТП, може бути використано принцип [57] виявлення рекуперації за частотним слідом в струмі фільтру випрямленої напруги.

Також важливим елементом у ефективності роботи інверторних перетворювачів є швидкодія їх спрацювання при наявності надлишкової рекуперації на ділянках, яка повинна ідентифікувати підвищення напруги на шинах ТП швидше ніж спрацює реле максимальної напруги на EPC і переведе його в режим реостатного гальмування. В якості параметру ідентифікації пропонується використовувати швидкість зміни напруги на шинах ТП, яка може бути виявлена як залишковий слід від стрибка напруги на струмоприймачі EPC на фідерній зоні. Для цього на основі отриманих реєстрограм в роботі встановлені граничні діапазони стрибків напруги на струмоприймачах EPC з контакторними системами регулювання при скиданні тяги, що приведені в табл. 2.6.

З табл. 2.6 видно, що комутаційні процеси в 3...4 рази більш прискорені у порівнянні з вмиканням режиму рекуперації на ненавантажену тягову мережу, коли має місце сплеск напруги і вимкнення рекуперації. В такому разі на цій відмінності можливо відстроювати систему ідентифікації надлишкової рекуперації на ділянках і використовувати цю прикмету для керування увімкненням накопичувачів або інверторів, для поглинання надлишку енергії.



Таблиця 2.6 – Статистичні характеристики стрибків напруги на струмоприймачах транспортних засобів з контакторною системою

Система електричної тяги за напругою	$U_{\text{ном}},$ В	Комутаційний режим		Режим рекуперації	
		$m[dU_c/dt],$ В/с	$\sigma[dU_c/dt],$ В/с	$m[dU_c/dt],$ В/с	$\sigma[dU_c/dt],$ В/с
Магістральні залізниці	3300	1520	320	395,4	86,3
Метрополітен	850	1453	483	428,6	42,8
Міський електротранспорт	750	1679	246	412,5	61,4

Отже, на ділянках тягового електропостачання з інверторними ТП можливі порушення режимів рекуперації енергії за умовами граничнодопустимої напруги на струмоприймачі транспортних засобів. На ефективність перетікань надлишкової рекуперативної енергії з тягової мережі 3,3 кВ до живлячої мережі середньої (високої) напруги суттєвий вплив здійснює режим роботи живлячої енергосистеми, тобто при недостатньому її навантаженні у вузлах приєднання ТП існує обмеження допустимого рівня напруги на виході інвертора.

### 2.3. Дослідження графіків потужності рекуперації в системах електричного транспорту постійного струму

Оцінка якісних показників енергії рекуперації була виконана для умов КП «Дніпровський метрополітен». Для вимірювання показників генерації енергії електропоїздів було використано вимірювальний комплекс cDAQ-9174 виробництва National Instruments, за допомогою якого були експериментально виміряні параметри споживання і генерації енергії електропоїздом 81-717(714).5М відповідно в режимах тяги та електричного гальмування [206].

На рис. 2.23 представлено реалізацію параметрів електроспоживання та генерації електроенергії електропоїздом метрополітену в режимі тяги та електричного гальмування, що експериментально виміряно в Дніпровському метрополітені.

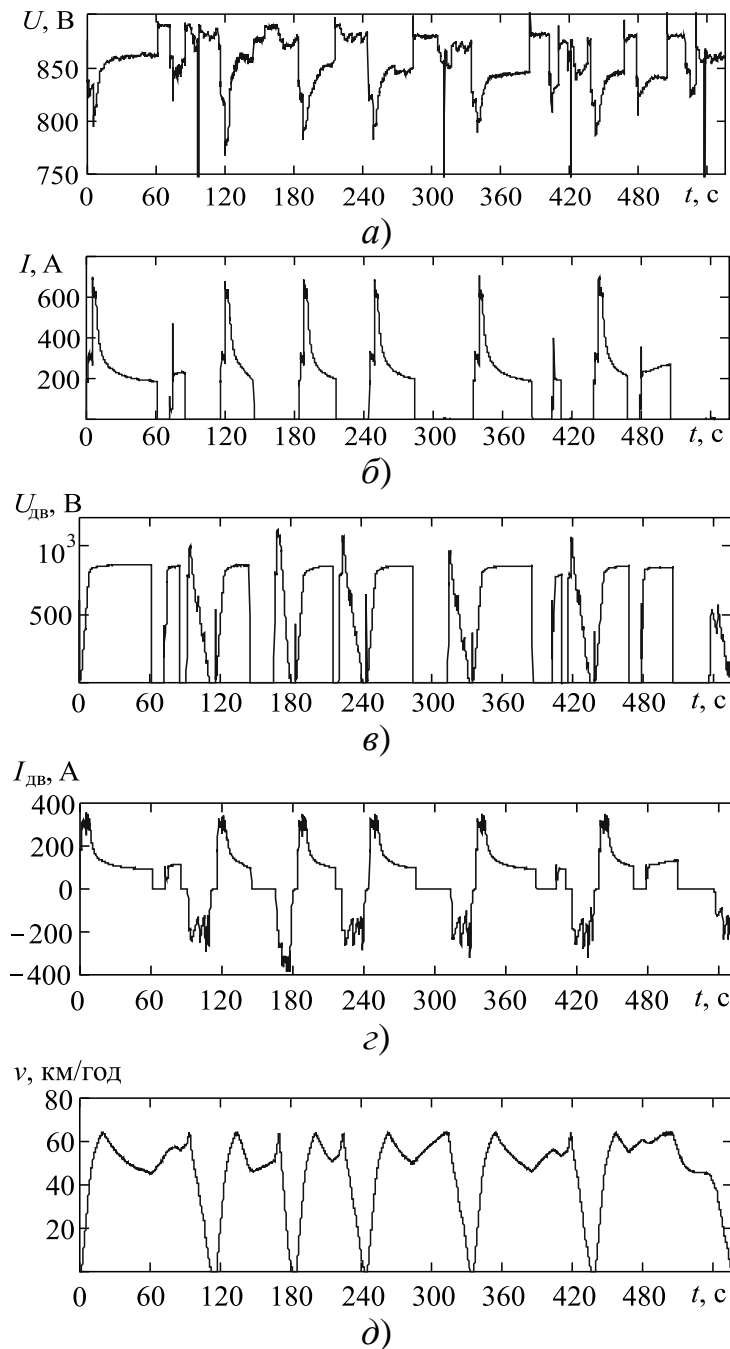


Рисунок 2.23 – Параметри режимів електроспоживання, генерації та руху електропоїзда метрополітену: *a* – напруга на струмоприймачі  $U(t)$ ; *б* – споживаний струм вагону  $I(t)$ ; *в* – напруга на групі двигунів  $U_{дв}(t)$ ; *з* – струм двигунів  $I_{дв}(t)$ ; *д* – швидкість руху електропоїзда  $v(t)$

Графіки миттєвої потужності електропоїзда з 3 вагонів в режимі тяги і електричного гальмування визначені за вимірними часовими залежностями відповідно до виразу (2.3) представлені на рис. 2.24.

$$P(t) = \begin{cases} 3U(t)I(t), & \text{при } P(t) > 0, \\ 6U_{\text{дв}}(t)I_{\text{дв}}(t), & \text{при } P(t) < 0, \end{cases} \quad (2.3)$$

В якості кількісного показника процесу рекуперації прийнята величини коефіцієнта відновлення (рекуперації), що є відношенням витрати енергії на тягу (з урахуванням витрат на власні потреби поїзду) до генерованої енергії при електричному гальмуванні

$$k_{\text{рек}} = \frac{\int_0^T U(t)I(t)dt}{2 \int_0^T U_{\text{дв}}(t)I_{\text{дв}}(t)dt}. \quad (2.4)$$

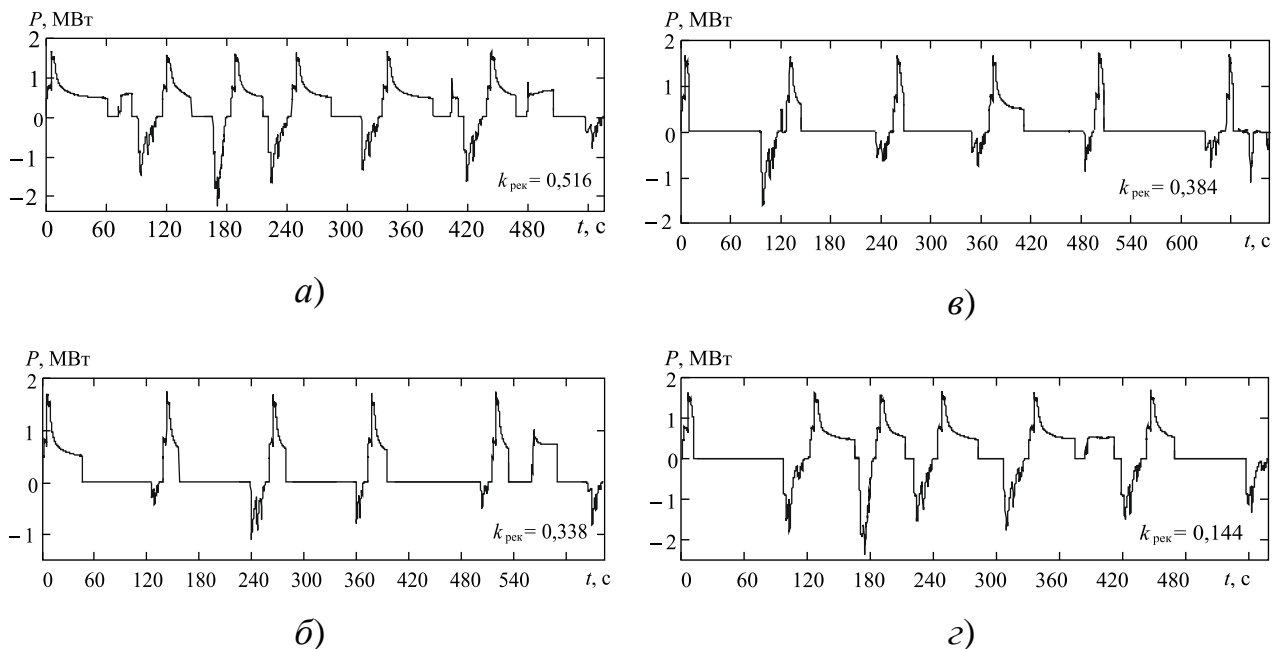


Рисунок 2.24 – Реалізації миттєвої потужності поїзда метрополітену (рекуперація при  $P(t) < 0$ )

Електричне гальмування в метрополітені як у системі циклічного руху використовується переважно з метою зупинного гальмування, а електроенергія, що при цьому генерується, має короткочасний характер зі спадаючою потужністю (рис. 2.24). В такому разі електропоїзд при рекуперації являє собою специфічне джерело нестабілізованої енергії що рухається в просторі і працює на тягову мережу паралельно з тяговими підстанціями.

За допомогою вимірних параметрів для метрополітену була оцінена ефективність процесу генерації електроенергії при електричному гальмуванні з точки зору ефективності її споживання в тому числі стабілізованими енергосистемами (живлячою мережею). Для цього було використано ряд специфічних інтегральних енергетичних показників [8, 58], що дозволяють оцінити якісний рівень електроенергії, генерованої електропоїздами при електричному гальмуванні (табл. 2.7), які необхідно враховувати при аналізі, наприклад доцільності повернення надлишкової рекупераційної енергії до системи зовнішнього електропостачання або сумісної роботи інверторів і накопичувачів енергії.

Таблиця 2.7 – Інтегральні показники графіків рекуперації енергії

№ п/п	Назва показника	Аналітичний вираз
1	Коефіцієнт мінімуму енергії рекуперації	$\beta = P_{\min} / P_{\max}$
2	Середньо-інтегральний коефіцієнт максимуму енергії рекуперації або пік-фактор	$\Pi = \frac{P_{\max}}{P_{\text{cp}}} = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt}$
3	Коефіцієнт заповнення або густина енергії рекуперації	$\gamma = \frac{P_{\text{cp}}}{P_{\max}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt}{P_{\max}}$
4	Тривалість максимальної стабільної рекуперації енергії	$t_{\text{cp max}} = \frac{\int_0^T P(t) dt}{P_{\max}} = \gamma T$
5	Діапазон коливання потужності рекуперації	$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$
6	Динамічна характеристика рекуперації або енергетичне прискорення	$P_V = \frac{dP(t)}{dt}$
7	Коефіцієнт форми потужності рекуперації	$K_{\Phi} = \frac{P}{P_{\text{cp}}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt}$
В приведених виразах $P_{\min}$ , $P_{\max}$ , $P_{\text{cp}}$ , $P(t)$ – відповідно мінімальна, максимальна, середня та миттєва потужності рекуперації поїзда		

Такі показники, наприклад як коефіцієнт форми, враховує не тільки рівень коливального характеру рекуперативної потужності, але й опосередковано дозволяє судити про збільшення втрат енергії рекуперації при її протіканні тяговою мережею до віддалених електропоїздів в режимі електроспоживання.

Для якісної характеристики ступеня коливання енергії рекуперації доцільно також розглянути також коефіцієнт коливання генерованої енергії, що фізично характеризує долю змінної (нестабілізованої) складової енергії рекуперації в її повній енергії і визначається як [207, 208]

$$K_k = \frac{\int_0^T |P(t) - P_{cp}| dt}{\int_0^T P(t) dt}. \quad (2.5)$$

Визначення даного коефіцієнту також може бути виконано на базі спектрального аналізу функції  $P(t)$  у вигляді виразу

$$K_k = \sum_{k=1}^{\infty} P^{(k)} / P^{(0)}, \quad (2.6)$$

де  $\sum_{k=1}^{\infty} P^{(k)}$  – сума амплітуд всіх гармонік з частотою  $f > 0$  ряду Фур'є функції  $P(t)$ ;  $P^{(0)} = P_{cp}$  – стала потужність рекуперації, або гармоніка з частотою  $f = 0$ .

Результати розрахунку чисельних значень розглянутих коефіцієнтів за виразами табл. 2. та формули (2.6) наведені в табл. 2.8. В якості періоду  $T$ , за який оцінювалися показники було прийнято час руху потяга по маршруту з однієї кінцевої зупинки до другої, що для Дніпропетровського метрополітену становить 9...12 хв.

Таблиця 2.8 – Діапазон чисельних значень інтегральних показників графіків рекуперації енергії в метрополітені

$\beta$	$\Pi$	$\gamma$	$t_{\text{ср max}}, \text{с}$	$\Delta P, \text{МВт}$	$K_{\Phi}$	$K_{\text{нст}}$
4...5	3...8	0,3...1,16	4...8	0,5...1,5	3...5	0,5...0,7

Аналогічні розрахунки були проведені для аналізу графіків рекуперації вантажних електровозів (ВЛ8) та трамваїв (ТЗД), результати яких приведені в табл. 2.9 [209].

Таблиця 2.9 – Діапазон зміни та основні імовірнісні показники графіків рекуперації енергії в вантажному магістральному та міському пасажирському русі

	Пік-фактор $\Pi$				Коеф. форми $K_{\Phi}$				Коеф. гарм. $K_{\Gamma}$			
	min	max	$m_{\Pi}$	$\sigma_{\Pi}$	min	max	$m_{K_{\Phi}}$	$\sigma_{K_{\Phi}}$	min	max	$m_{K_{\Gamma}}$	$\sigma_{K_{\Gamma}}$
Електровоз ВЛ8	1,40	7,52	2,57	1,65	1,05	3,72	1,38	0,72	0,30	3,58	0,82	0,86
Трамвай ТЗД	1,19	7,1	2,78	0,62	1,15	2,10	1,61	0,16	0,56	3,60	0,98	0,19

З аналізу реальних графіків  $P(t)$  і даних табл. 2.7 і 2.8 видно, що генерована транспортними засобами при рекуперації енергія характеризується значною нерівномірністю в часі, її показники змінюються в широкому діапазоні і носять імовірнісний характер та залежать переважно від параметрів гальмування. Так величина коефіцієнта коливання вказує на те, що енергія рекуперації володіє значною змінною складовою, що знаходиться в діапазоні 30...50 %, а значення коефіцієнта форми свідчать про можливі перевищення в 3...5 разів втрат рекуперативної енергії в тяговій мережі над мінімально можливими втратами при сталій генерації.

Мала тривалість максимально стабільної рекуперації 4...8 с свідчить про внесення імпульсних спотворень (у вигляді низькочастотної модуляції струму) до живлячої мережі 6 (10) кВ при передачі в неї надлишкової енергії гальмування поїздів. Значна відмінність розглянутих показників від їх оптимальних значень свідчить про збільшений рівень втрат такої енергії в тяговій мережі та

необхідність їх врахування при розв'язання проблеми використання надлишкової енергії рекуперації, особливо при обґрунтуванні доцільності її повернення в зовнішню мережу шляхом інвертування на тягових підстанціях.

## Висновки до розділу 2

1. В умовах реальної експлуатації систем електрифікованого транспорту розповсюджені часті відключення режимів рекуперації, що викликано збільшенням напруги на струмоприймачах транспортних засобів до максимально допустимого значення (4,0 кВ) внаслідок відсутності в моменти генерування в зоні рекуперації тягового електроспоживання інших поїздів. У деяких випадках при включенні рекуперації напруга на струмоприймачі поїздів досягає небезпечних значень  $> 4500$  В.

2. Експериментальні дослідження режимів рекуперації на ділянках з інвертуючими ТП Львівської залізниці виявили, що ефективність споживання надлишкової енергії рекуперації поїздів системою зовнішнього електропостачання (на приєднаннях 35, 110, 220 кВ) залежить від режимів нетягових споживачів у вузлах приєднання ТП залізниць, особливо коли енергосистема є недовантаженою. Також встановлено, що при підключенні суміжних інвертуючих ТП до ліній різного класу напруги має місце нерівномірний розподіл завантаження суміжних ТП в режимі рекуперації, що збільшує втрати генерованої енергії в тягових мережах залізниць.

3. 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.

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  $k_\phi$  для трамваї – про збільшений в 2,1...2,8 рази рівень втрат рекуперативної енергії в опорі тяговій мережі над мінімальним рівнем. Короткочасність генерації ( $t_{\text{cp max}} = 4,7...8,7$  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.

**Матеріали розділу опубліковано в [49, 206-209].**



### РОЗДІЛ 3

## МОДЕЛЮВАННЯ КВАЗІУСТАЛЕНИХ ПРОЦЕСІВ СТРУМОРОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ В СИСТЕМАХ ТЯГОВОГО І ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

### 3.1. Загальні підходи до моделювання режимів систем тягового електропостачання та їх мета

Для вивчення питань ефективності розподілу та використання енергії рекуперації на всіх рівнях підсистем електрифікованого транспорту найбільш зручним засобом є моделювання цих процесів. Це дозволяє дослідити вплив режимів тягового і зовнішнього електропостачання та організації руху електро-транспорту на режим напруги в КМ, рівень перетоків надлишкової рекуперативної енергії на суміжні МПЗ до віддалених тягових навантажень та її втрат в тяговій мережі, а також ефективність інших процесів (наприклад, споживання надлишкової енергії рекуперації первинною енергосистемою). При дослідженні ефективності передачі надлишкової енергії рекуперації в первинну енергосистему визначальним чинником є режими нетягових навантажень у вузлах приєднання ТП до живлячих ЛЕП (6, 10, 35, 110, 220 кВ). Враховуючи випадкову складову в даних режимах, а також короткочасний характер енергії рекуперації, аналіз перетоків надлишкової рекуперативної енергії в зовнішню енергосистему найбільш раціонально проводити з допомогою стохастичних або нечітких методів, в основі яких лежить моделювання графіків нетягових навантажень. При цьому також можливо виконувати оцінку впливу даних перетікань на якість електроенергії в живлячих лініях. Крім цього моделювання дозволяє вивчати питання ефективності використання енергії рекуперації в перспективних СТЕ, що містять стаціонарні накопичувачі енергії, пункти підживлення КМ від відновлюваних джерел та ін.

Оптимізація режимів СТЕ за енергетичним критерієм базується на попередньому дослідженні даних режимів на основі моделювання та прогнозування режимів роботи СТЕ [20, 210-223]. Основу роботи імітаційних моделей стано-

вить формування і розрахунок миттєвих схем, під яким розуміється розрахунок струморозподілу схеми і визначення миттєвих значень наступних параметрів: струмів фідерів, втрат напруги в місцях розташування навантаження, втрат електроенергії в тяговій мережі і ТП.

У фундаментальних роботах [173, 174] для забезпечення надійного електропостачання ЕРС постійного струму в режимі тяги і РТ запропонована система автоматичного регулювання напруги в КМ (система «Сирена») з допомогою пристроїв регулювання напруги на шинах ТП. При цьому реалізується синхронне регулювання напруги на одній або декількох фідерних зонах при наявності надлишкової енергії рекуперації для можливості її передачі на віддалені МПЗ з поїздами в тяговому режимі. При значному підвищенні напруги в КМ, що виникає при глибокому рекуперативному режимі ЕРС система «Сирена» переводить ТП на мінімальний рівень стабілізованої напруги напівпровідникового перетворювача 3500 В, що забезпечує перетікання енергії рекуперації на сусідні МПЗ. При зниженні потужності рекуперації напруга рекуперуючого ЕРС зменшується і система повертається до алгоритму підтримки тягового режиму, наприклад з режимом стабілізованої напруги 3500 В.

В роботах [17, 178, 179, 182] використовується аналогічна ідея для рішення подібної задачі, де пропонується використовувати систему безконтактного автоматичного регулювання напруги на шинах ТП (системи БАРН) в аналогічних цілях. В [14, 129] приводяться результати теоретичних і експериментальних досліджень ефективності впровадження запропонованої системи для підвищення рівня рекуперації електроенергії в СЕТ постійного струму. Однак в даних роботах не розв'язується питання оптимізації розподілу надлишкової енергії рекуперації з урахуванням енергетичного критерію.

В основі моделювання розглядуваних процесів лежить спільне виконання тягових розрахунків та розрахунків миттєвих схем СТЕ. На базі виконаних тягових розрахунків можуть бути визначені параметри електроспоживання та розташування транспортних засобів на ділянці, що при відомих параметрах СТЕ

ділянки дозволить визначити можливі напрями поширення енергії рекуперації та її оптимальний напрям.

На рис. 3.1 представлені можливі канали розподілу енергії рекуперації транспортного засобу в елементах системи електричної тяги постійного струму з урахуванням можливості її накопичення на ТП та передачі в СЗЕ в межах однієї ТП.

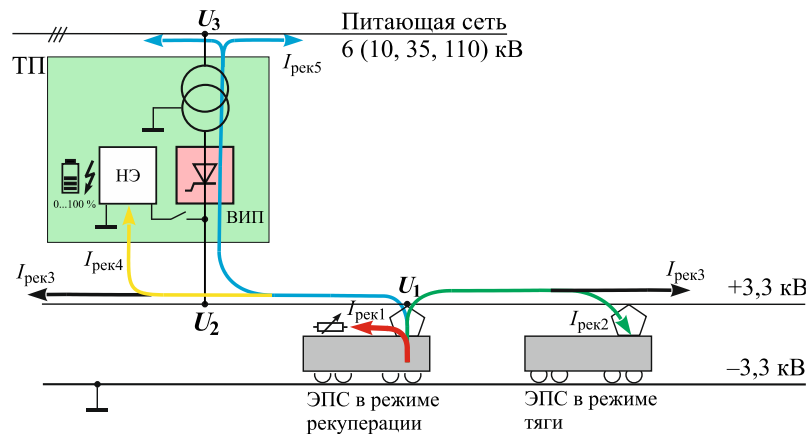


Рисунок 3.1 – Потoki розподілу енергії рекуперації в системі електротранспорту постійного струму

Енергія рекуперації в системі електротранспорту з класичною (некерованою) СТЕ розподіляється пропорційно відстані до її потенціальних споживачів (транспортних засобів в режимі тяги) та потужності їх тягових навантажень, при цьому відбувається її часткове розсіювання на елементах СТЕ. Втрати енергії рекуперації в тяговій мережі можуть бути виражені як

$$\Delta W_{\text{рек}} = r_{\text{ТМ}} \sum_{k=1}^n \int_{t_{\text{н}}}^{t_{\text{к}}} I_{\text{рек } k}^2 L_{\text{рек } k} dt = r_{\text{ТМ}} \sum_{k=1}^n \int_{t_{\text{н}}}^{t_{\text{к}}} \left( \frac{P_{\text{тяг } k}}{U_{\text{км } k}} - I_{\text{ТП } k} \right)^2 L_{\text{рек } k} dt, \quad (3.1)$$

де  $r_{\text{ТМ}}$  – питомий опір тягової мережі, Ом/км;

$I_{\text{рек } k}$  – частина струму рекуперації споживана  $k$ -тим споживачем;

$L_{\text{рек } k}$  – відстань до  $k$ -того споживача струму рекуперації;

$P_{\text{тяг } k}$ ,  $U_{\text{км } k}$  – відповідно споживана потужність (тягова) та напруга на струмоприймачі  $k$ -того споживача;

$I_{\text{ТП}k}$  – частина тягового струму ЕРС, споживаного від ТП;

$t_n, t_k$  – відповідно час початку і закінчення рекуперації енергії.

В елементах СТЕ постійного струму (3,3 кВ) величина втрат  $\Delta W_{\text{рек}}$  може сягати значення 10...15 % від величини генерованої енергії  $W_{\text{рек}}$  [64], що близько до значення втрат енергії при тяговому електроспоживанні. У СТЕ метрополітенів (825 В) і міського електротранспорту (550 В) частка  $\Delta W_{\text{рек}}/W_{\text{рек}}$  зростає пропорційно зниженню величини живлячої напруги.

Природний розподіл енергії рекуперації в системі електротранспорту з некерованою СТЕ (навіть з урахуванням можливості її накопичення на ТП та передачі в СЗЕ) не завжди виявляється ефективним за енергетичним критерієм

$$\Delta W_{\text{рек}}(L_{\text{рек}}) \rightarrow \min, \quad (3.2)$$

що визначається можливим значним віддаленням від рекуперуючого ЕРС споживача найбільшої потужності або інвертуючих (накопичувальних) ТП [226].

Оптимальний розподіл енергії  $W_{\text{рек}}$  в тяговій мережі може бути досягнуто при переході до концепції так званого керованого (гнучкого, інтелектуального) тягового електропостачання. При цьому керуючі органи СТЕ будуть знаходити канали перерозподілу енергії  $W_{\text{рек}}$  за енергетичним критерієм (3.5) в залежності від дислокації тягових навантажень на фідерній зоні та їх потужності, а також накопичувачів і інверторів енергії, режимів напруги на вводах на ТП. При цьому обмежувальним фактором оптимального управління є забезпечення надійності тягового електропостачання поїздів на ділянках. У такому випадку при наявності надлишкової енергії рекуперації залежно від рівня попереднього заряду накопичувачів і режимів зовнішньої мережі повинні прийматися рішення про підключення накопичувачів або інверторів енергії, або плавному зниженні напруга на шинах ТП в діапазоні допустимих значень. Крім виконання критерію (3.5) принцип гнучкого розподілу енергії  $W_{\text{рек}}$  дозволить вирішити науково-практичну задачу визначення оптимальних місць

розташування накопичувачів і інверторів енергії, а також пристроїв плавного регулювання напруги на шинах ТП під навантаженням при мінімізації кількості і встановленої потужності додаткового енергозберігаючого електрообладнання в СТЕ (накопичувачів, інверторів, регуляторів напруги на шинах ТП, пунктів підживлення тощо).

### 3.2. Модель ЕРС в режимі рекуперації енергії

Особливістю моделювання режиму рекуперації електроенергії ЕРС є те, що в цьому режимі ЕРС працює паралельно з системою електропостачання на тягове навантаження і являє собою рухоме джерело, параметри енергії якого залежать від параметрів гальмування і режиму СТЕ. При короткочасному гальмуванні в КМ генеруються нетривалі імпульси електроенергії (3...15 с), тому в режимі рекуперації ЕРС в загальному випадку являє собою джерело нестабілізованої енергії. На відміну від моделей джерел, що розглядаються в класичній теорії кіл, побудова адекватної моделі ЕРС в режимі рекуперації для завдань дослідження ефективності розподілу та використання рекуперативної енергії вимагає врахування параметрів руху ЕРС (параметрів режиму гальмування), рівня тягового навантаження в зоні рекуперації, напруги на шинах ТП і ряду інших.

При побудові моделі ЕРС в режимі рекуперації електроенергії необхідно виділити два характерні різновиди рекуперативного гальмування:

– тривала рекуперація при гальмуванні з метою обмеження швидкості руху на затяжному спуску (при постійній швидкості), коли переважно реалізується потенційна енергія поїзда за виразом (1.5);

– короткочасна рекуперація при гальмуванні для зупинки, зниження або стабілізації швидкості руху, коли короткочасно реалізується кінетична за виразом (1.4) (потенційна) енергія поїзда.


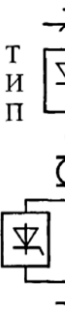
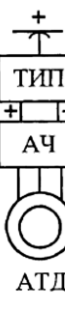
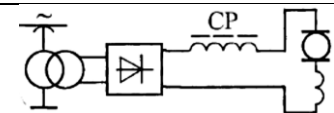
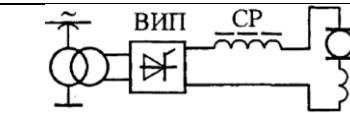
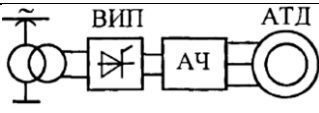
У першому випадку гальмування, особливо при незмінному ухилі і достатньому рівні тягового навантаження в зоні рекуперації, процес генерації є стій-

ким а енергія стабілізованою (практично постійний струм рекуперації). Це властиво магістрального руху при пригальмовуванні поїзда на затяжному спуску, де в залежності від довжини ухилу і швидкості руху рекуперація може тривати 2...20 хв.

У другому випадку енергія що генерується має короткочасний характер, що зазвичай зустрічається при гальмуванні в циклічному русі для зупинки, або коли рекуперація використовується для підтримки заданої швидкості руху поїзда за рахунок автоматичних переходів з режиму тяги в рекуперацію і навпаки (при коливаннях профілю колії), при яких генерація енергії триває близько 0,05...1,5 хв.

В табл. 3.1 наведено принципові силові схеми основних типів ЕРС [7], що експлуатуються в Україні і закордоном. На експлуатованих в Україні вантажних електровозах постійного струму ВЛ8, ВЛ10, ВЛ11М, ВЛ82М режим РГ виконується за схемою незалежного збудження ТЕД з протизбудником (рис. 3.1) [1, 2, 14].

Таблиця 3.1 – Класифікація структур ЕРС щодо можливості здійснення рекуперації

		Принципова електрична схема транспортного засобу		
Род струму	Постійний	 <p><u>Регулювання:</u> 1. реостатне; 2. перегрупування; 3. ослаблення поля.</p> <p><u>Рекуперація за схемою незалежного збудження</u></p>	 <p><u>Регулювання:</u> 1. імпульсне; 2. ослаблення поля.</p> <p><u>Рекуперація за схемою послідовного збудження</u></p>	 <p><u>Регулювання:</u> 1. частотне.</p> <p><u>Рекуперація можлива</u></p>
	Змінний	 <p><u>Регулювання:</u> 1. секціонування обмоток трансформатора; 2. ослаблення поля.</p> <p><u>Рекуперація відсутня</u></p>	 <p><u>Регулювання:</u> 1. ВП; 2. часткове зоно-фазне; 3. ослаблення поля.</p> <p><u>Рекуперація з інвертором</u></p>	 <p><u>Регулювання:</u> 1. ВП+АПН (частотне); 2. частково зоно-фазне;</p> <p><u>Рекуперація можлива</u></p>

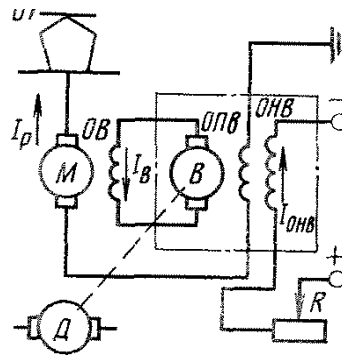


Рисунок 3.1 – Спрощена схема РГ з протизбудженням збудника

Для здійснення РГ обмотки збудження ОВ ТЕД підключають до якоря збудника В. Збудник має дві обмотки: незалежну ОНВ, яка живиться від стороннього джерела енергії, і обмотку протизбудження ОПВ, включену послідовно в коло струму рекуперації. Магнітні потоки обох обмоток, створювані відповідно струмами, спрямовані зустрічно. При збільшенні струму рекуперації у випадку зменшення напруги в КМ струм обмотки протизбудження знижує результуючий магнітний потік збудження збудника.

Відповідно зменшуються збудження генератора (ТЕД) і його ЕРС. Коли напруга в КС підвищується, струм рекуперації зменшується і всі процеси в схемі проходять у зворотному порядку. Це забезпечує сталу гальмівну силу при постійній швидкості руху на спуску, або постійну потужність гальмування. Таким чином даний тип ЕРС в режимі рекуперації може розглядатися як джерело постійної потужності, або джерело струму, кероване напругою в контактній мережі. Аналогічні функціональні зв'язки при коливаннях напруги в контактній мережі реалізуються на електровозах ДЕ1 та ВЛ11М6, де замість електромашинного збудника для незалежного живлення обмоток збудження ТЕД використовується статичний перетворювач. Крім того, у цьому випадку обмотки збудження кожної постійно включеної послідовної групи тягових машин живляться від індивідуальних випрямлячів, що дозволяє вирівнювати навантаження паралельно включених груп машин шляхом корекції їх струмів збудження, а також забезпечувати рівну ступінь протикомпаундування гальмівних характеристик при використанні

традиційної системи управління гальмами, наприклад, при модернізації експлуатованих електровозів тільки з заміною електромашинних збудників статичними.

Експлуатований ЕРС з колекторним приводом і класичною схемою рекуперації дозволяє реалізовувати РГ з віддачою енергії в мережу при швидкостях до 40 км/год [14], що пов'язано з граничним регулюванням напруги ТЕД в генераторному режимі (за рахунок зміни збудження електричних машин постійного струму). Область можливого використання рекуперації обмежена мінімальною швидкістю ЕРС, а саме

$$v_{\min} = \frac{U_{\text{км}} - \sum E_{\text{дв}}}{C_{\text{дв}} \Phi_{\text{дв max}}} \approx \frac{U_{\text{км}}}{C_{\text{дв}} \Phi_{\text{дв max}}}, \quad (3.3)$$

тобто обмежена по струму збудження  $I_{\text{в max}} \equiv \Phi_{\text{дв max}}$ .

Для забезпечення стійкої рекуперації сумарна е. р. с. двигунів  $\sum E_{\text{дв}}$  повинна бути більше напруги в контактній мережі  $U_{\text{км}}$ , а зі зменшенням швидкості поїзда при гальмуванні величина  $\sum E_{\text{дв}}$  також зменшується. Тому для розширення зони швидкостей рекуперації і зниження  $v_{\min}$  необхідно з пониженням швидкості руху підтримувати співвідношення  $U_{\text{км}} < \sum E_{\text{дв}}$ . Це здійснює машиніст в першу чергу, збільшуючи число послідовно з'єднаних якорів двигунів, тобто застосовуючи перехід з паралельного на послідовно-паралельне і послідовне з'єднання двигунів, при якому в тому числі збільшується жорсткість гальмівних характеристик.

Високі швидкості закінчення ефективності рекуперативного гальмування приводять до того, що енергія гальмування (при швидкостях руху нижче 40 км/год) не може бути реалізована, зважаючи на неможливість її передачі в живильну мережу при існуючій системі РГ. ЕРС з плавним регулюванням потужності і ланкою постійного струму в цьому сенсі мають більш ефективну систему РГ, оскільки дозволяють використовувати його майже до зупинки поїзда (до 5 км/год) і рекуперувати в мережу завдяки безконтактним регуляторам напруги.



Основною проблемою використання РГ, притаманною будь-якій системі ЕРС, є значна залежність режиму рекуперації від рівня напруги в КМ, яка визначається поїзною ситуацією в зоні рекуперації, і яку не можливо в повній мірі забезпечити існуючими графіками руху поїздів. Для забезпечення надійного електричного гальмування на ЕРС циклічної дії у всьому діапазоні напруги в КМ використовується система рекуперативно-реостатного гальмування, при якій автоматично утилізується надлишкова частина струму рекуперації в гальмівних реостатах ЕРС, таким чином, щоб напруга на струмоприймачі поїзда задовольняла лівій границі (1.8), що, однак, з енергетичної точки зору є неефективним використанням генерованої енергії.

На сучасному ЕРС з плавним регулюванням потужності при гальмуванні у діапазоні швидкостей  $v_p < v < v_{\max}$  в режимі рекуперації система автоматики для забезпечення сталості гальмівного зусилля підтримує постійну потужність рекуперації (рис. 3.2, б) [1]. При коливаннях напруги у контактній мережі в межах допустимих значень  $U_{\text{км}}^{\min} \dots U_{\text{км}}^{\max}$  буде відбуватися коливання рекуперативного струму

$$I_{\text{рек}} = P_{\text{рек}} / U_{\text{км}} = I_{\text{рек}}(U_{\text{км}}),$$

тому в кожен момент часу струм рекуперації є функцією напруги на струмоприймачі ЕРС. В такому разі, строго кажучи, поїзне навантаження є нелінійним і повинно моделюватися також у вигляді джерела сталої потужності, або джерела струму, що керується напругою.

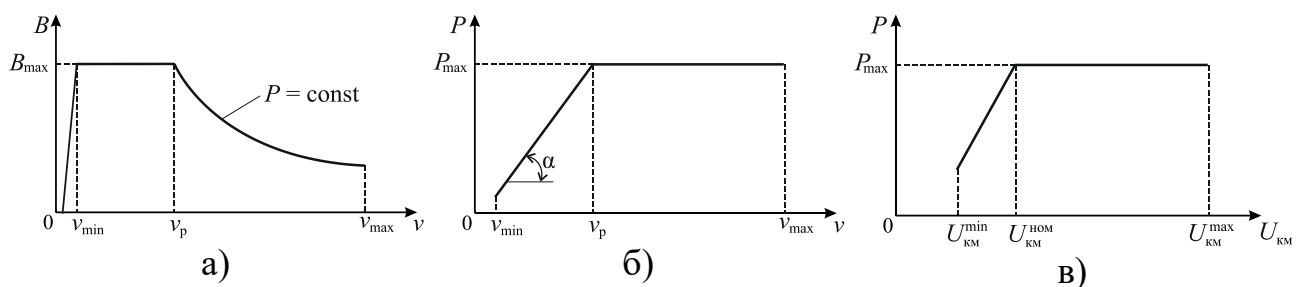


Рисунок 3.2 – Характеристики ЕРС з плавним регулюванням потужності в режимі рекуперації

Якщо ж діапазон коливань напруги на струмоприймачі є незначним, то ЕРС в режимі рекуперації з достатньою точністю можна вважати ідеальним джерелом струму. На ЕРС постійного струму з дискретним регулюванням потужності для стабілізації струму в режимі рекуперації використовується система протизбудження збудника сумісно із системою автоматичного управління рекуперативним гальмуванням, тому у діапазоні швидкостей  $v_p < v < v_{\max}$  ЕРС даного типу також можна розглядати у вигляді ідеального джерела струму.

При рекуперації енергії зі зниженням швидкості руху в діапазоні  $v_{\min} < v < v_p$  кінетична енергія поїзда, а отже і генерована потужність зменшуються пропорційно швидкості, а при  $v < v_{\min}$  рекуперація в мережу є неможливою, тому при даному режимі ЕРС представляє собою джерело струму, умовно кероване параметрами гальмування (швидкістю руху) та тягової мережі (напругою на струмоприймачі), що є специфічною особливістю рухомого джерела енергії. При зниженні напруги в контактній мережі рекуперативна потужність ЕРС за умовами струмового обмеження по нагріву обладнання також автоматично зменшується (рис. 3.2, в).

В такому разі моделлю ЕРС в режимі рекуперації може виступати кероване напругою джерело струму, що аналітично записується як

$$I_{\text{рек}}(U_c) = \begin{cases} I_{\text{рек}}, & \text{при } U_c < U_c^{\max}, \\ I_{\text{рек}} - I_{\text{надл}}, & \text{при } U_c = U_c^{\max}, \\ 0, & \text{при } U_c > U_c^{\max}, \end{cases}$$

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

Зниження струму рекуперації  $I_{\text{рек}}$  на величину  $I_{\text{надл}}$  дозволяє забезпечувати виконання правої границі умови (1.8) для рекуперуючого ЕРС при обмеженому тяговому електроспоживанні в зоні рекуперації.

### 3.3. Моделі елементів системи тягового електропостачання

Електрифікований транспорт отримує живлення від енергосистеми з різним рівнем напруги на вводах СТЕ. Так, наприклад ТП міського електротранспорту (550 В) і метрополітенів (825 В) отримують живлення переважно по кабельних лініях від міських розподільних мереж (6, 10 кВ), а ТП магістрального електрифікованого залізничного транспорту постійного струму (3,3 кВ) частіше підключаються до повітряних ліній (35, 110 кВ), вкрай рідко до кабельних (6, 10 кВ). Крім живлення електротягових навантажень ТП магістральних залізниць забезпечують також живлення нетягових (районних) споживачів через відповідні обмотки (на 10 або 35 кВ) понижуючих трансформаторів.

Система електропостачання електрифікованого транспорту в загальному випадку включає в себе районні підстанції (РП) з лініями електропередачі (ЛЕП) підключених до електростанцій (ТЕС, АЕС), тягові підстанції (ТП), тягову мережу, тягову навантаження і нетягових споживачів (рис. 3.3).

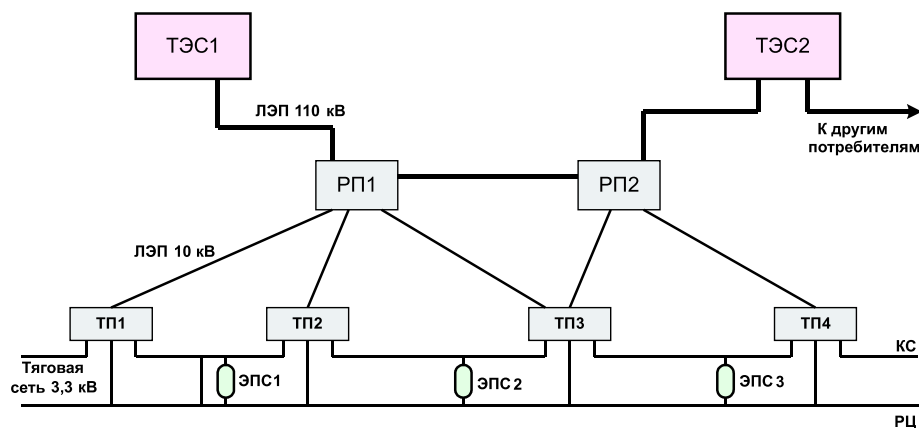


Рисунок 3.3 – Структура електропостачання системи електротранспорту

В даний час енергопостачальні компанії (обленерго) належать різним власникам, тому являють собою в певному сенсі різні енергосистеми. При цьому однією з особливостей електропостачання магістрального електротранспорту є підключення ТП до ЛЕП різних енергосистем з різними рівнями напруги, промислового навантаження і т.д. Внаслідок цього на стику підключень даних ТП

у залізниці виникають проблеми, пов'язані з перетіканням активної потужності в тяговій мережі і виникненням зрівняльних струмів, при яких тягові навантаження живляться не тільки від суміжних ТП, але і від віддалених, що призводить до додаткових втрат електроенергії. Один з варіантів схеми підключення електрифікованого ділянки постійного струму, що складається з п'яти ТП до СЗЕ наведено на рис. 3.4.

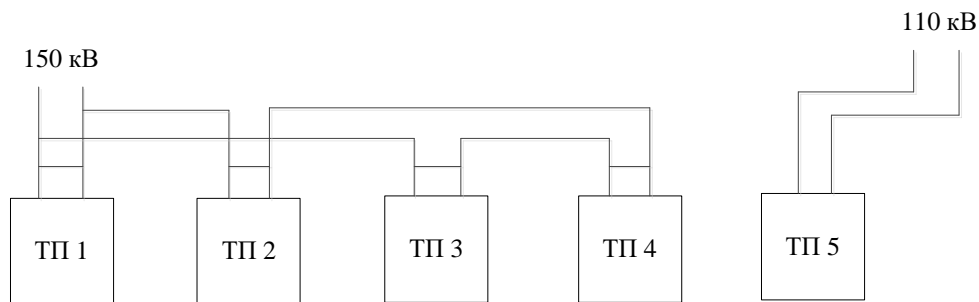


Рисунок 3.4. – Схема підключення СТЕ до СЗЕ

При моделюванні процесів взаємодії елементів тягового і зовнішнього електропостачання в режимах рекуперації досліджувану енергосистему зручно представити у вигляді трьох складових частин:

1. Джерела живлення СТЕ, що включають СЗЕ (РП, ЛЕП);
2. Джерела живлення тягової мережі (ТП) і нетягових споживачі;
3. Електротягові і рекупераційні навантаження.

Для дослідження ефективності розподілу енергії рекуперації в системі електротранспорту необхідно удосконалити і уточнити модель СЕТ. Дана модель повинна забезпечувати визначення напруг на шинах ТП і струмоприймачах ЕРС в залежності від генерованих і споживаних струмів (потужностей) поїздів та їх взаємного розташування, величини надлишкових струмів рекуперації, втрат енергії рекуперації та ін. Основними складовими моделі є наступні елементи:

- схема заміщення ЕРС в режимі тяги і рекуперації;
- схема заміщення елементів СТЕ;
- аналітичні вирази, що зв'язують між собою електричні параметри режимів ЕРС і СТЕ.

При складанні даних моделей необхідно виконати ряд припущень [179]:

- робота СТЕ при рекуперації розглядається в усталеному режимі;
- вплив зносу КМ і температури навколишнього середовища на опір тягової мережі не враховується;
- режим електроспоживання ЕРС заданий величиною струму (потужності);
- питомий опір рейкової і тягової мережі прийнято постійним на аналізованій ділянці.

Потокорозподіл енергії рекуперації в СЕТ може вважатися сталим енергетичним процесом, оскільки визначається інерційними режимами руху поїздів, тобто електромеханічні перехідні процеси при аналізі миттєвих схем СТЕ можуть не враховуватися.

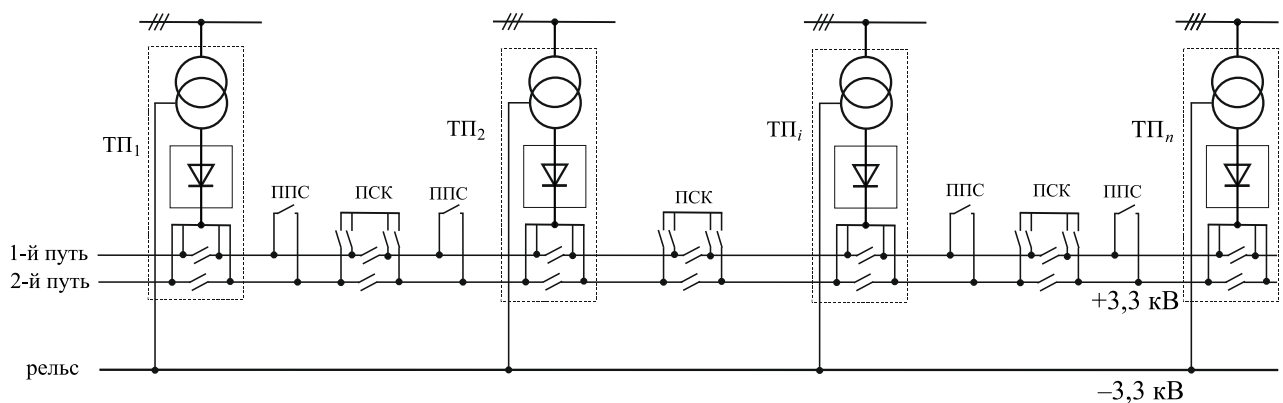
Моделювання процесів струморозподілу енергії рекуперації у системі електричного транспорту постійного струму з класичної СТЕ (з неінвертованими ТП, без НЕ) не вимагає врахування впливу параметрів і режимів живлячих мереж (СЗЕ), оскільки струми рекуперації розподіляються виключно в тяговій мережі (споживаються на тягу поїздів попутного і зустрічного проходження) і не можуть бути передані у зовнішню енергосистему. Чинниками що впливають на ефективність використання енергії рекуперації при цьому будуть виступати розміри і графіки руху поїздів, що визначають віддаленість рекуперативних поїздів від тих що в режимі тяги, а також співвідношення їх струмів  $I_{рек} / I_{тяг}$ . Однак при зниженні тягового електроспоживання на ділянках ефективність (дальність) передачі рекуперативної енергії в тяговій мережі буде залежати від напруги холостого ходу на шинах ТП, яке в свою чергу опосередковано залежить від напруги на вводі ТП, яка формується режимами СЗЕ.

Одним з головних етапів створення моделі СТЕ є створення алгоритму розрахунку миттєвих схем, що представляють собою електричні кола зі змішаним з'єднанням елементів – послідовних (контактна мережа та рейки) і паралельних (тягові підстанції та ЕРС). Усталені режими СТЕ зазвичай описуються відомими законами Ома і Кірхгофа. Застосування цих законів дозволяє отримати системи рівнянь вузлових напруг або контурних струмів, що представляють

собою математичну модель усталеного режиму. Математичний аналіз усталених режимів СТЕ постійного струму, по суті, зводиться до складання і розв'язання систем лінійних рівнянь.

Окремі елементи системи електропостачання при розрахунку усталеного режиму представляються схемами заміщення, що складаються із елементів електричної кола. Джерела електроенергії при моделюванні СТЕ зазвичай представляються у вигляді джерела напруги з ЕРС  $E$  і внутрішнім опором  $R$ , або у вигляді джерела струму, значення якого дорівнює струму усталеного режиму. Електротягове навантаження при аналізі усталених режимів представляється у вигляді опору або джерела струму.

Для спрощення системи рівнянь вузлових потенціалів, що описують стабільний режим тягової мережі при рекуперації енергії в [19] схема заміщення розрахункової ділянки тягової мережі приводиться до вигляду, де рейкове коло замінюється ідеальним провідником, а її опір підсумовується з опором контактної мережі. В цьому випадку всі мінусові затискачі ЕРС виявляються з'єднаними в одній точці, потенціал якої буде однаковим і приймається нульовим (базовий вузол). Однак при цьому унеможливується визначення дійсних значень напруги на струмоприймачах поїздів, тому (хоч це і збільшить порядок системи лінійних рівнянь) зручніше користуватися реальними схемами заміщення СТЕ, одна з яких наведена на рис. 3.5.



а)

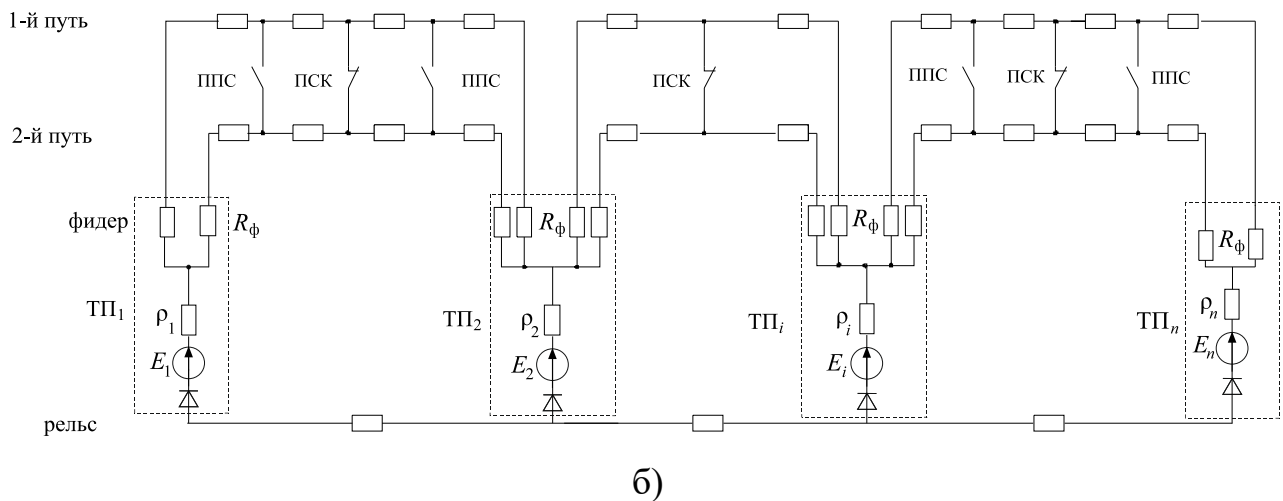


Рисунок 3.5. – Схема електропостачання двокільної ділянки тяги постійного струму (а) та її електрична модель (б)

Вихідною інформацією при розрахунку СТЕ є параметри системи електропостачання (зовнішні характеристики і паспортні дані силового обладнання ТП, характеристики живлячих фідерів і тягової мережі з урахуванням зносу, схема живлення контактної мережі), інформація про координати поїздів на ділянках і споживаних ними струмів.

При формуванні миттєвої схеми заміщення СТЕ на паралельних характеристиках елементів за позитивне приймається струм, спрямований до проводів контактної мережі (для випрямних агрегатів і рекуперативних поїздів), від'ємним – струм, спрямований від проводів до колії (для приймачів надлишкової енергії рекуперації і поїздів у режимі тяги).

Для схеми заміщення ТП з випрямлячем зовнішня характеристика в загальному випадку будується за формулою:

$$U(I) = E_{\text{вн}} - I\rho_{\text{вн}}, \quad (3.4)$$

де  $E_{\text{вн}}$  – ЕРС джерела, що відповідає напрузі холостого ходу випрямленої напруги на шинах ТП;

$I$  – струм ТП;

$\rho_{\text{вн}}$  – внутрішній опір ТП в режимі випрямлення струму для номінального режиму, який визначається за формулою

$$\rho_{\text{вн}} = \frac{AE_{\text{вн}}}{I_{\text{ном}}} \left( \frac{u_{\text{кз}} \%}{100n} + \frac{S_{\text{ном}}}{S_{\text{кз}}} \right), \quad (3.5)$$

де  $A$  – коефіцієнт відносного нахилу зовнішньої характеристики агрегату, що залежить від схеми випрямлення струму;

$n$  – кількість працюючих агрегатів;

$I_{\text{ном}}$  – номінальний струм одного агрегату;

$u_{\text{кз}} \%$  – напруга короткого замикання тягового трансформатора;

$S_{\text{ном}}$  – номінальна потужність первинної обмотки одного трансформатора;

$S_{\text{кз}}$  – потужність короткого замикання на шинах, від яких отримують живлення перетворювальні агрегати (на збірних шинах або у випадку подвійної трансформації – на вторинній стороні понижувальних трансформаторів).

З огляду на односторонню провідність ТП постійного струму без інверторів розрахунок миттєвих схем СТЕ при наявності в тяговій мережі надлишкового струму рекуперації не повинен допускати зворотних струмів через вітки ТП, що не забезпечує рівняння зовнішньої характеристики ТП виду (3.). У такому випадку аналіз усталених режимів СТЕ, строго кажучи, повинен здійснюватися на базі розв'язання системи нелінійних рівнянь стану миттєвих схем СТЕ. Рівняння зовнішньої характеристики ТП при цьому має враховувати її одnobічну провідність, тобто рівняння (3.) необхідно доповнити спадом напруги на випрямлячі, тобто

$$U(I) = E_{\text{вн}} - I\rho_{\text{вн}} - U_{\text{VD}}(I). \quad (3.6)$$

З достатнім ступенем точності ВАХ ідеального випрямляча для отримання односторонньої провідності ТП може бути апроксимована експонентною функцією виду

$$U_{\text{VD}}(I) = -ae^{-bI}, \quad (3.7)$$

графік якої наведено на рис. 3.6.



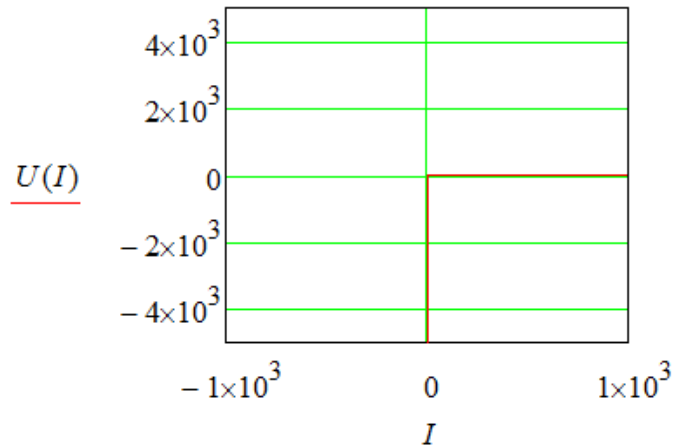


Рисунок 3.6 – ВАХ ідеального випрямляча

У формулі (3.7) коефіцієнти  $a$ ,  $b$  позитивні дійсні числа, причому ВАХ наближається до характеристики ідеального випрямляча при виборі їх значень в області допустимих напруг і струмів ТП таким чином, щоб  $a \rightarrow 0$ , а  $b \rightarrow \infty$ . При цьому забезпечується одностороння провідність ТП, що при холостому ході ТП ( $I = 0$ )  $U_{VD}(0) \approx 0$ , у режимі видачі енергії ТП ( $I > 0$ )  $U_{VD}(I) \rightarrow 0$ , а коли напруга на шинах ТП стає більше напруги холостого ходу (у випадку рекуперації і відсутності споживача  $U_{штП} > U_{xx} = E_{вн}$ ) струм через гілку з ТП не протікає ( $I = 0$ ). В даному випадку ТП якби «закривається» і припиняє живлення тягових навантажень, а через її шини відбувається перетік надлишкової енергії рекуперації на сусідню МПЗ до віддалених тягових навантажень (при умові що за граничнодопустимою напругою на струмоприймачі рекуперація не припинилася).

Для зручності імітаційного моделювання взаємодії ЕРС в режимі рекуперації з системою тягового електропостачання в середовищі MathLab і розширення його функціональних можливостей розроблена динамічна модель тягової мережі, де рухомі джерела струму є зафіксованими в просторі а вплив їх положення визначається зміною функцій опору тягової мережі [153]. Дана модель для одноколійної ділянки з консольним живленням, довжиною плеча  $x_0$  та питомим опором тягової мережі  $r_0$  представлена на рис. 3.7, де розглядається ви-

падок знаходження трьох поїздів. Режим електроспоживання або рекуперації визначається напрямком струму джерела струму.

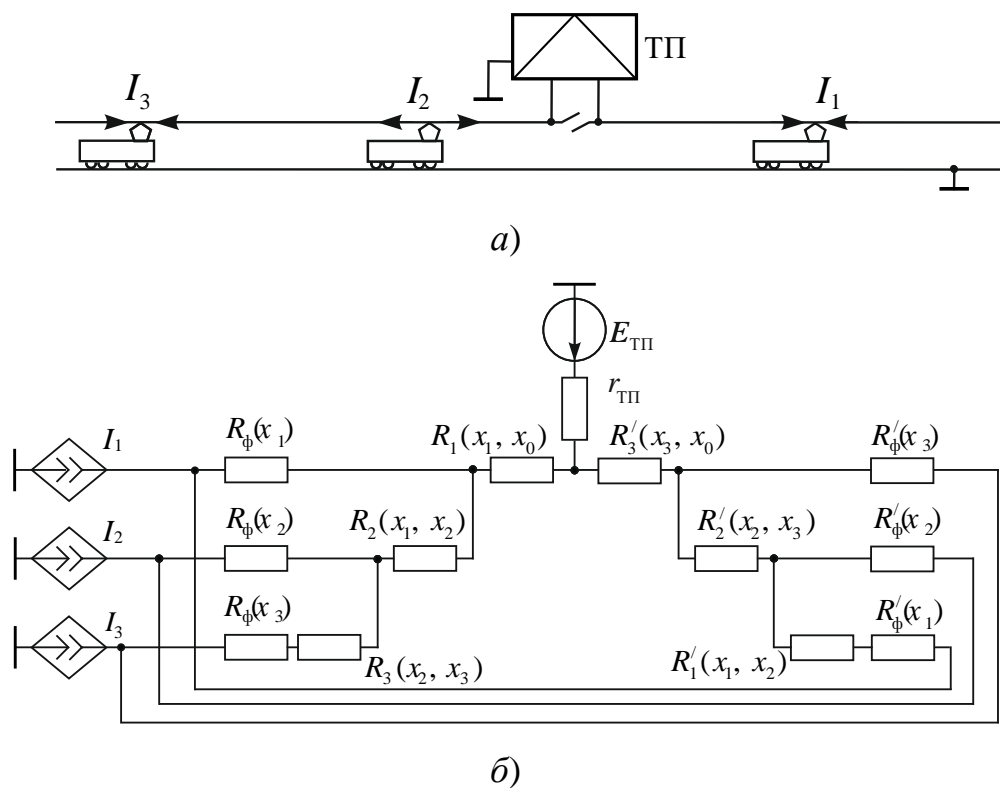


Рисунок 3.7 – Одноколійна ділянка СТЕ (а) та її миттєва схема заміщення (б)

Функції опору даної ділянки описуються наступними виразами:

$$R_1(x_1) = \begin{cases} r_0(x_0 - x_1), & \text{при } x_0 \leq x_1, \\ 0, & \text{при } x_0 > x_1 \end{cases}, \quad (3.8)$$

$$R_2(x_1, x_2) = \begin{cases} r_0(x_1 - x_2), & \text{при } x_1 \leq x_0, x_2 \leq x_0 \\ r_0(x_0 - x_2), & \text{при } x_0 > x_1, x_2 \leq x_0, \\ 0, & \text{при } x_1 > x_0, x_2 > x_0 \end{cases}, \quad (3.9)$$

$$R_3(x_2, x_3) = \begin{cases} r_0(x_2 - x_3), & \text{при } x_2 \leq x_0, x_3 \leq x_0 \\ r_0(x_0 - x_3), & \text{при } x_2 > x_0, x_3 \leq x_0, \\ 0, & \text{при } x_2 > x_0, x_3 > x_0 \end{cases}, \quad (3.10)$$

$$R_\phi(x_1) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_1 \leq x_0, \\ \infty, & \text{при } x_1 > x_0 \end{cases}, \quad (3.11)$$

$$R_{\phi}(x_2) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_2 \leq x_0 \\ \infty, & \text{при } x_2 > x_0 \end{cases}, \quad (3.12)$$

$$R_{\phi}(x_3) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_3 \leq x_0 \\ \infty, & \text{при } x_3 > x_0 \end{cases}, \quad (3.13)$$

$$R_1'(x_1, x_2) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_1 \leq x_0, x_2 \leq x_0 \\ r_0(x_1 - x_0), & \text{при } x_1 > x_0, x_2 \leq x_0 \\ r_0(x_1 - x_2), & \text{при } x_1 > x_0, x_2 > x_0 \end{cases}, \quad (3.14)$$

$$R_2'(x_2, x_3) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_2 \leq x_0, x_3 \leq x_0 \\ r_0(x_2 - x_0), & \text{при } x_2 > x_0, x_3 \leq x_0 \\ r_0(x_2 - x_3), & \text{при } x_2 > x_0, x_3 > x_0 \end{cases}, \quad (3.15)$$

$$R_3'(x_3) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_3 \leq x_0 \\ r_0(x_3 - x_0), & \text{при } x_3 > x_0 \end{cases}, \quad (3.16)$$

$$R_{\phi}'(x_1) = \begin{cases} \infty, & \text{при } x_1 \leq x_0 \\ 0, & \text{при } x_1 > x_0 \end{cases}, \quad (3.17)$$

$$R_{\phi}'(x_2) = \begin{cases} \infty, & \text{при } x_2 \leq x_0 \\ 0, & \text{при } x_2 > x_0 \end{cases}, \quad (3.18)$$

$$R_{\phi}'(x_3) = \begin{cases} \infty, & \text{при } x_3 \leq x_0 \\ 0, & \text{при } x_3 > x_0 \end{cases}, \quad (3.19)$$

де  $R_1(x_1)$ ,  $R_1'(x_1, x_2)$ ;  $R_2(x_1, x_2)$ ,  $R_2'(x_2, x_3)$ ;  $R_3(x_2, x_3)$ ,  $R_3'(x_3)$  – відповідно опори тягової мережі між поїздами і ТП в залежності від їх положення і положення інших поїздів.

Опори що визначаються виразами (3.11)-(3.13) та (3.17)-(3.19) є фіктивними опорами, що виконують функцію приналежності струму поїзда до того плеча живлення тягової мережі, що відповідає координаті поїзда.

Загальний вигляд імітаційної моделі, створеної в середовищі MathLab представлено на рис. 3.8.

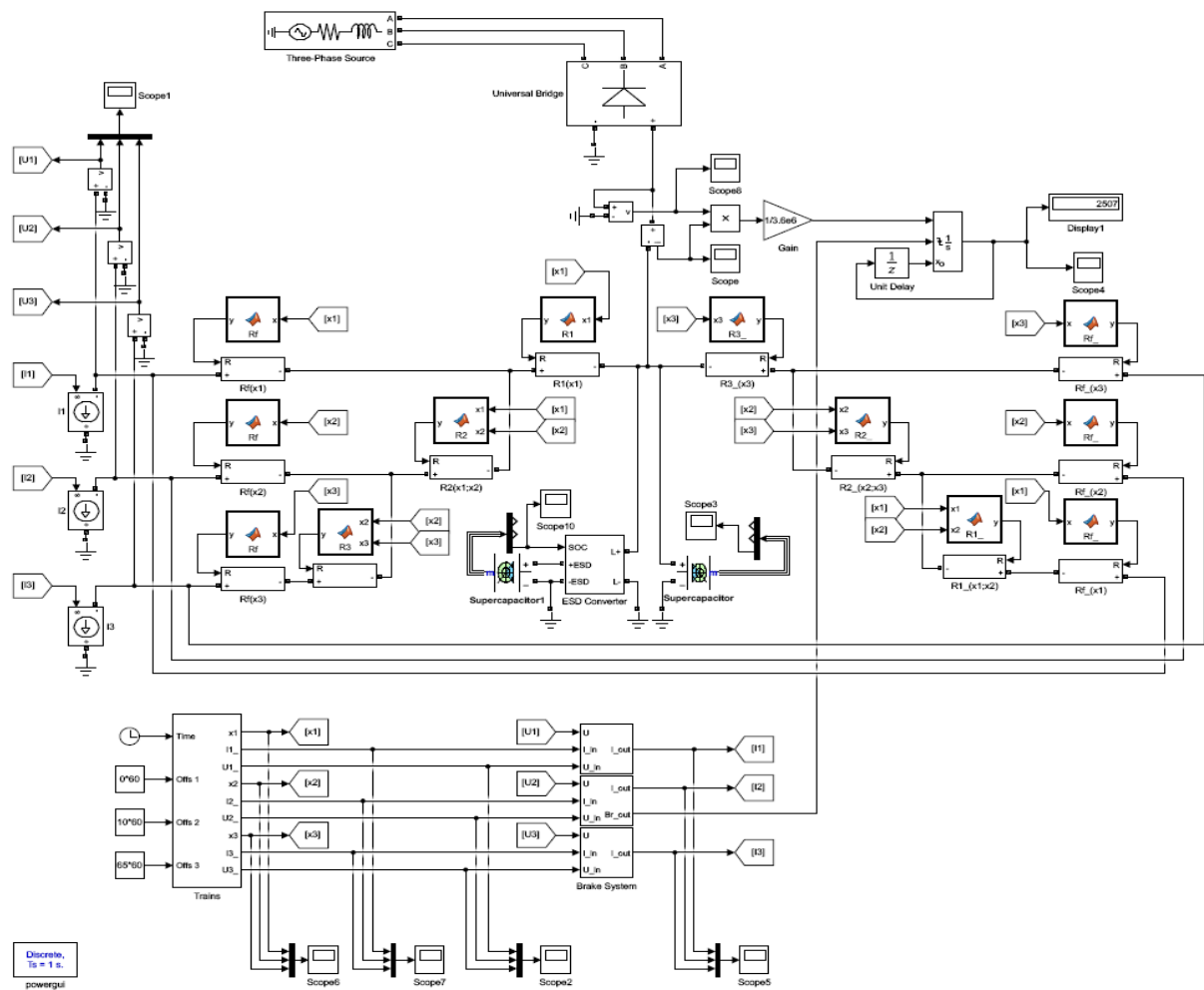


Рисунок 3.8 – Імітаційна модель системи тягового електропостачання

Для дослідження можливостей накопичення надлишкової енергії рекуперації до моделі СТЕ потрібно ввести модель накопичувача енергії та аналітично описати його енергообміні режими, що дозволить надалі обирати раціональні закони керування параметрами режиму заряду-розряду, а саме швидкістю і глибиною режиму.

В якості моделі накопичувача була прийнята відома схема заміщення ємнісної суперконденсаторної батареї, як найбільш універсального типу накопичувача, схема заміщення якої враховує струми витoku конденсатора і його активний опір (рис. 3.9).

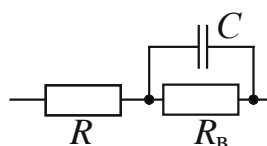


Рисунок 3.9 – Схема заміщення ємнісного накопичувача

Процес заряду даного накопичувача від постійної напруги описується відомими рівняннями зарядного струму накопичувача та напруги на його ємності, що дорівнюють

$$i_{\text{зар}}(t) = \frac{U}{R + R_{\text{в}}} + \frac{UR_{\text{в}}}{R(R + R_{\text{в}})} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$u_{\text{С зар}}(t) = \frac{UR_{\text{в}}}{R + R_{\text{в}}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

де  $U$  – постійна зарядна напруга,

$$\tau = \frac{RR_{\text{в}}C}{R + R_{\text{в}}} \text{ – постійна часу кола.}$$

При розрахунку напруги на ємнісному елементі накопичувача при його заряді під дією неперіодичної напруги  $U_{\text{рек}}(t)$  (від нестабілізованого джерела живлення – рекуперуючого поїзда) найбільш зручно скористатися інтегралом Дюамеля, який при кусочно-неперервній функції  $U_{\text{рек}}(t)$  (або з розривами першого роду) має вигляд

$$u_{\text{С зар}}(t) = \sum_{n=1}^m \Delta U_{\text{рек } n}(t_n) h_U(t - t_n) + \sum_{n=1}^m \int_{t_n}^{t_{n+1}} \frac{dU_{\text{рек } n}(t)}{dt} h_U(t - \tau) d\tau +$$

$$+ \int_{t_m}^t \frac{dU_{\text{рек } m}(t)}{dt} h_U(t - \tau) d\tau, \quad (3.20)$$

де  $h_U(t) = \frac{R_{\text{в}}}{R + R_{\text{в}}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$  – перехідна функція по напрузі для даного кола;

$$\Delta U_{\text{рек } n}(t_n) = U_{\text{рек } n+1} - U_{\text{рек } n} \text{ – стрибок напруги в момент } t_n.$$

Якщо розглядати функцію  $U_{\text{рек}}(t)$  як кусочно-постійну (рис. 3.10, лінія 1), то похідні під інтегралом дорівнюють нулю і вираз (3.20) складається лише з суми добутків стрибків напруги на перехідну функцію, зсунуту на час стрибка

$$u_{\text{С зар}}(t) = \sum_{n=1}^m \Delta U_{\text{рек } n}(t_n) h_U(t - t_n). \quad (3.21)$$

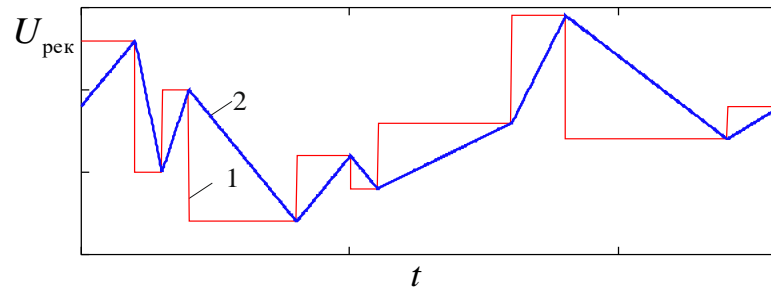


Рисунок 3.10 – Варіанти апроксимації функції прикладеної напруги: 1 – кусочно-постійна, 2 – лінійна

Якщо  $U_{\text{рек}}(t)$  розглядається як неперервна (рис. 3.10, лінія 2), то в (3.20) не враховується складова (3.21). Після спрощення (3.21) отримуємо кусочно-неперервну функцію  $u_{C \text{ зар}}(t)$ , яка справедлива для окремих інтервалів часу. Вираз напруги на ємності в залежності від поточного значення прикладеної напруги на інтервалі часу  $t_n \leq t < t_{n+1}$  має вигляд

$$u_{C \text{ зар}}(t) = \frac{R_B}{R + R_B} \sum_{n=1}^m (U_{\text{рек } n+1} - U_{\text{рек } n}) \left( 1 - e^{-\frac{t-t_n}{\tau}} \right), \quad (3.22)$$

Для кусочно-неперервної функції цей вираз дещо ускладнюється, але є більш точним

$$u_{C \text{ зар}}(t) = \frac{R_B}{R + R_B} \sum_{n=1}^m \frac{U_{\text{рек } n+1} - U_{\text{рек } n}}{t_{n+1} - t_n} \left( (t_{n+1} - t_n) - \tau \left( e^{-\frac{t-t_{n+1}}{\tau}} - e^{-\frac{t-t_n}{\tau}} \right) \right). \quad (3.23)$$

Вид перехідної напруги на ємнісному елементі НЕ в залежності від представлення вхідної напруги показано на рис. 3.11.

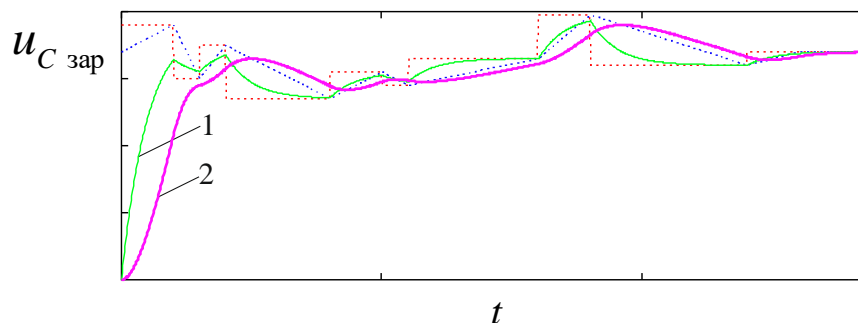


Рисунок 3.11 – Залежність напруги накопичувача при кусочно-постійній (крива 1) та при кусочно-лінійній (крива 2) апроксимаціях прикладеної напруги

Зарядний струм накопичувача може бути визначено як

$$i_{\text{зар}}(t) = C \frac{d}{dt} u_{C \text{ зар}}(t) + \frac{u_{C \text{ зар}}(t)}{R_B},$$

графік якого представлено для відповідної залежності  $u_{C \text{ зар}}(t)$  на рис. 3.12.

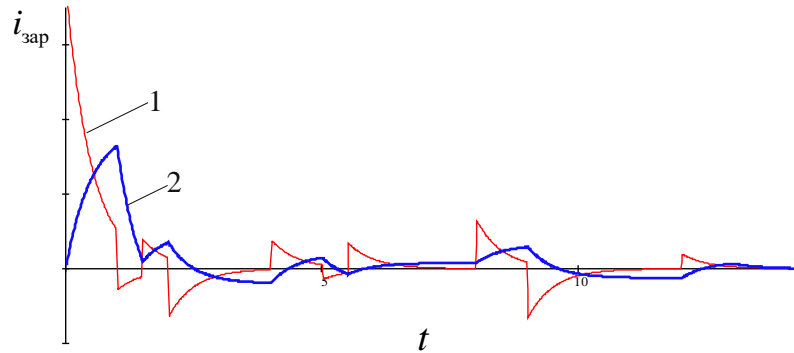


Рисунок 3.12 – Зарядний струм накопичувача при кусочно-постійній (крива 1) та при кусочно-лінійній (крива 2) апроксимаціях прикладеної напруги  $U_{\text{рек}}(t)$

Рівняння (3.22) і (3.23) є рекурсивними, тобто вирази для визначення  $u_{C \text{ зар}}(t)$  на наступних інтервалах часу повторюють всі попередні доданки суми. Враховуючи дану властивість вираз для  $u_{C \text{ зар}}(t)$  на наступному інтервалі часу може отримуватись на основі попереднього значення, для чого використовуються початкові умови на основі законів комутації. Це дозволяє спростити отримання залежності  $u_{C \text{ зар}}(t)$  використовуючи циклічні розрахунки. При цьому вираз напруги для інтервалу часу  $t_n \leq t < t_{n+1}$  при відповідній формі представлення вхідної дії приймає вигляд

$$u_{C \text{ зар}}(t) = u_{C \text{ зар}}(t_n) + (U_{\text{рек } n+1} - u_{C \text{ зар}}(t_n)) \left( 1 - e^{-\frac{t-t_n}{\tau}} \right), \quad (3.24)$$

або

$$u_{C \text{ зар}}(t) = u_{C \text{ зар}}(t_n) + \left( \frac{U_{\text{рек } n+1} - u_{C \text{ зар}}(t_n)}{t_{n+1} - t_n} \right) \left( (t - t_n) - \tau \left( 1 - e^{-\frac{t-t_n}{\tau}} \right) \right), \quad (3.25)$$

де значення  $u_{C \text{ зар}}(t_n)$  береться з попереднього аналітичного виразу, отриманого для інтервалу  $t_{n-1} \leq t < t_n$ .

Оскільки прикладена до накопичувача напруга задається дискретним законом, що містить багато значень, то визначення напруги на накопичувачі за рекурсивними виразами (3.22)-(3.25) є громіздким, тому можливим лише у вигляді циклічних розрахунків за допомогою використання ЕОМ. В середовищі MathCad даний циклічний розрахунок для випадку прикладеної напруги з 4964 точок при використанні виразу (3.25) має вигляд, що представлено на рис. 3.13.

```

r_UH := | t ← 0
        | i ← 1
        | resi,1 ← t
        | resi,2 ←  $\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{Uk2(t + dt)}{dt} \cdot \left[ t - \tau \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]$ 
        | i ← i + 1
        | t ← t + dt
        | while t < 4964
        | | resi,1 ← t
        | | resi,2 ← resi-1,2 +  $(Uk2(t) - res_{i-1,2}) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{dt}{\tau}} \right) + \frac{Uk2(t + dt) - Uk2(t)}{dt} \cdot \left[ dt - \tau \cdot \left( 1 - e^{-\frac{dt}{\tau}} \right) \right]$ 
        | | i ← i + 1
        | | t ← t + dt
        | res

```

Рисунок 3.13 – Блок циклічного розрахунку напруги за рекурсивним виразом (3.25)

Розрахунок напруги  $u_{C \text{ зар}}(t)$  за виразами (3.22) і (3.24), а також (3.23) і (3.25) дають ідентичні результати.

Якщо безпосередньо приєднати НЕ до тягової мережі або до силового кола ЕРС то в точці приєднання після його повного заряду він буде виступати певним буфером напруги при різкозмінних навантаженнях. На рис. 3.14 представлена залежність напруги накопичувача, приєданого на реальну напругу на струмоприймачу електропоїзда.



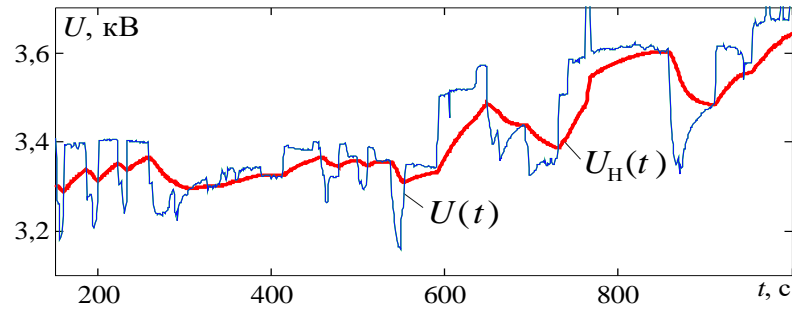
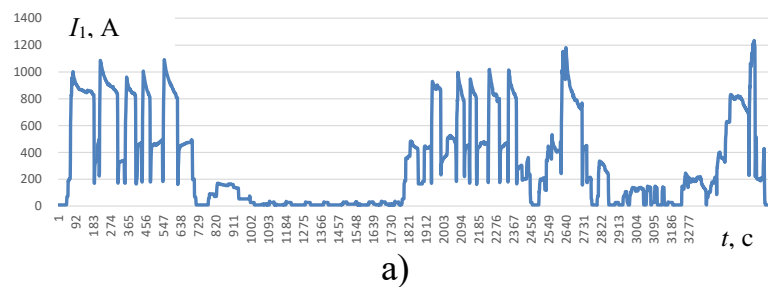


Рисунок 3.14 – Напруга на струмоприймачі електропоїзда (крива 1), напруга на накопичувачі (крива 2)

Основною задачею накопичувача в СТЕ є поглинання надлишкового струму рекуперації поїздів та забезпечення допустимого рівня напруги на їх струмоприймачах. Розглянемо процеси електроспоживання та рекуперації поїздів, що знаходяться на сусідніх міжпідстанційних зонах і рухаються з однаковими швидкостями, один з яких знаходиться у режимі електричного гальмування зі струмом рекуперації  $I_{\text{рек}}(t)$ , а другий з струмом тяги  $I_{\text{тяг}}(t)$ , при якому періодично має місце надлишковий струм рекуперації на ділянці. Струмові профілі поїздів представлені на рис. 3.15, де надлишковий струм рекуперації визначається виразом (рис. 3.16, в)

$$I_{\text{надл}}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } I_{\text{тяг}}(t) > |I_{\text{рек}}(t)|, \\ I_{\text{рек}}(t) - I_{\text{тяг}}(t), & \text{при } I_{\text{тяг}}(t) < |I_{\text{рек}}(t)|. \end{cases}$$



а)

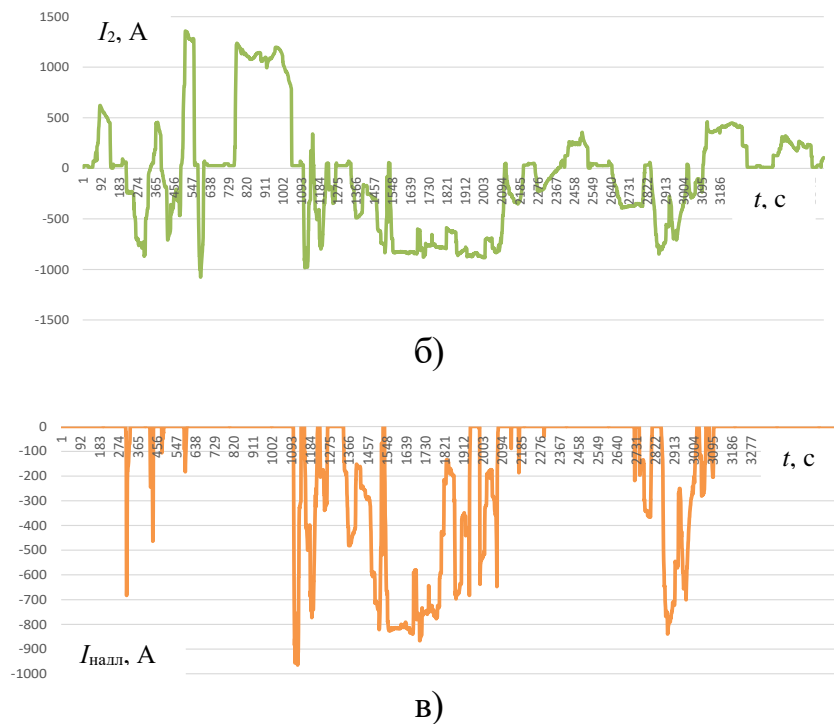


Рисунок 3.15 – Графіки струмів поїздів

При безпосередньому приєднанні накопичувача до шини постійного струму ТП неможливо забезпечити споживання ним заданого струму, тому потрібен проміжний перетворювач постійно-постійної напруги, що буде керувати процесом заряду накопичувача.

### 3.4. Моделювання взаємодії ЕРС в режимі рекуперації з системою тягового електропостачання

Оскільки перерахунок струмових характеристик електропоїздів в тяговому і гальмівному режимах проводиться для напруги на струмоприймачі, отриманої на попередньому кроці розрахунку, при заміщенні електропоїзд може бути представлений у вигляді джерела струму з незмінним значенням в робочому діапазоні напруги контактної мережі.

З урахуванням усього вищевикладеного схема заміщення однієї міжпідстанційної зони може бути представлена наступним чином (рис. 3.17).

Якщо розв'язувати рівняння стану електричного кола, то необхідно отримати рішення рівнянь порядку  $p$  (число віток). Зазвичай число вузлів у схемі

заміщення СТЕ менше, ніж число віток, тому якщо визначати спочатку напруги у вузлах схеми відносно базового, то порядок розв'язуваної системи знизиться до  $(q - 1)$ , де  $q$  – кількість вузлів у схемі.

За вказаною вище причини для розрахунку параметрів системи електричної тяги був обраний метод вузлових потенціалів, який дозволяє за допомогою ЕОМ аналізувати тягові мережі досить складної конфігурації і використовувати при вирішенні даної задачі матрично-топологічний підхід [210-222]. В якості параметрів СТЕ для нормального режиму було використано данні з [223].

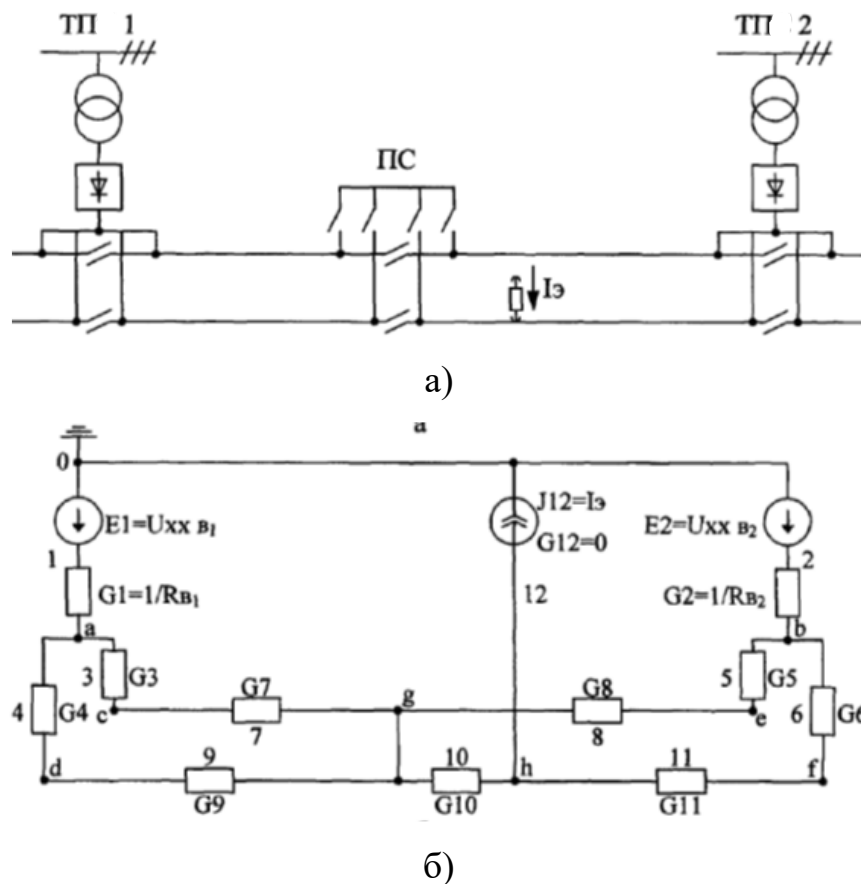


Рисунок 3.17 – Розрахункова схема (а) і схема заміщення (б) електрифікованої двоколійної ділянки залізниці з вузловим живленням

Система  $(q - 1)$  рівнянь, що зв'язує напругу вузлів (відносно базового) з задаючим струмом у вузлах, називається системою вузлових рівнянь. У матричній формі вона може бути записана наступним чином:

$$AG^{(B)}A^T\varphi = AJ^{(B)} - AG^{(B)}E^{(B)}, \quad (3.26)$$

де  $A$  – матриця з'єднань (вузлова матриця);

$G^{(B)}$  – діагональна матриця провідностей гілок;

$\varphi$  – матриця вузлових потенціалів;

$J^{(B)}$  – стовпцева матриця задаючих струмів гілок;

$E^{(B)}$  – стовпцева матриця задають ЕРС гілок.

Матриця з'єднань являє собою таблицю коефіцієнтів рівнянь, складених за першим законом Кірхгофа для вузлів. Рядки цієї матриці відповідають вузлам схеми, стовпці – віткам:

$$A = [a_{ij}], \quad (3.27)$$

$a_{ij} = 1$ , якщо гілка  $j$  з'єднана з вузлом  $i$  та спрямована від вузла,  $a_{ij} = -1$ , якщо вітка  $j$  з'єднана з вузлом  $i$  та спрямована до вузла,  $a_{ij} = 0$ , якщо вітка  $j$  не з'єднана з вузлом  $i$ .

Якщо позначити матрицю вузлових провідностей як

$$G^{(y)} = AG^{(B)}A^T, \quad (3.28)$$

а матрицю вузлових струмів

$$J^{(y)} = AJ^{(B)} - AG^{(B)}E^{(B)}, \quad (3.29)$$

система вузлових рівнянь запишеться більш коротко у вигляді

$$G^{(y)}\varphi = J^{(y)}. \quad (3.30)$$

У матриці вузлових провідностей на головній діагоналі записують суми провідностей віток, приєднаних до відповідного вузла, з позитивним знаком. Елемент  $g_{ij}$  матриці вузлових провідностей ( $i \neq j$ ) дорівнює сумі провідностей віток, зв'язаних між вузлами  $i$  та  $j$ , взятої з від'ємним знаком. Матриця вузлових провідностей симетрична, тобто має місце умова взаємності

$$g_{ij} = g_{ji} \quad \text{и} \quad G^{(y)} = [G^{(y)}]^T. \quad (3.31)$$

Елемент  $J^{(y)}$  матриці вузлових струмів дорівнює алгебраїчній сумі струмів джерел струму, приєднаних до  $j$ -го вузла, включаючи струми джерел струму, еквівалентні джерелами ЕРС. При цьому із додатнім (від'ємним) знаком записують струми, спрямовані до вузла (від вузла).

Таким чином, по відомій матриці вузлових провідностей і матриці вузлових струмів з (3.7) визначаються потенціали всіх вузлів схеми заміщення, а за відомими провідностями віток визначається струморозподіл електричної енергії в СТЕ.

Для підвищення ефективності досліджень впливу рекуперації електричної енергії на основні показники роботи СТЕ бажано знати окремо струморозподіл електричної енергії рекуперації та енергії, що надійшла в СТЕ із системи зовнішнього електропостачання. Отримання результуючого струморозподілу і кожної його складової можливо тільки з застосуванням методу накладання.

Розрахунок струморозподілу в СТЕ при використанні даного методу здійснюється в наступній послідовності:

1) проводиться розрахунок результуючого струморозподілу електричної енергії, коли враховується і енергія, що надходить в СТЕ з СЗЕ, і енергія рекуперації;

2) визначається струморозподіл електричної енергії, що надходить в тягову мережу, від електропоїздів, які перебувають у режимі рекуперативного гальмування;

3) за відомими результуючим струморозподілом і струморозподілом електричної енергії рекуперації визначається струморозподіл електричної енергії, що надійшла в СТЕ з СЗЕ.

Алгоритм розрахунку СТЕ постійного струму при наявності на ділянці рекуперуючих електропоїздів та відсутності на підстанціях приймачів надлишкової енергії рекуперації представлений на рис. 3.18.

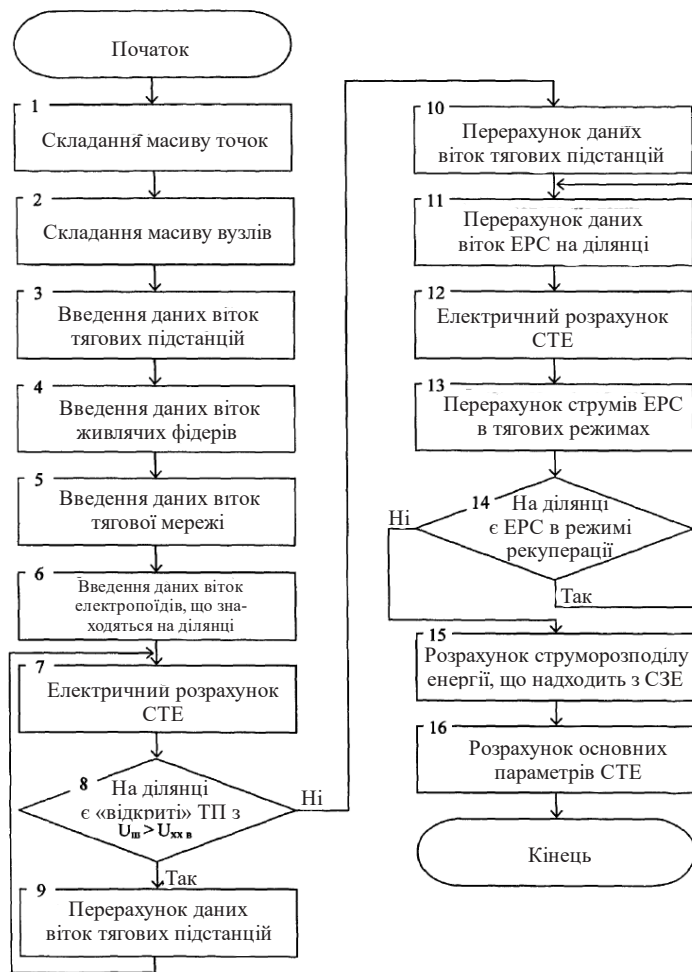


Рисунок 3.18 – Алгоритм розрахунку системи тягового електропостачання постійного струму при наявності рекуперації електричної енергії

У блоці 1 відбувається складання багатовимірному масиву точок – для кожного об'єкта на ділянці вказуються його розташування, тип об'єкта (тягова підстанція (ТП), пост секціонування (ПС), пункт паралельного з'єднання (ППЗ), ЕРС) і якщо це ЕРС, то вказується його струм (табл. 3.2).

З урахуванням даних масиву точок у блоці 2 провадиться складання масиву вузлів (нумерація вузлів схеми заміщення наступна: шини тягових підстанцій, точки підключення до контактної мережі живлячих фідерів, місця підключення ЕРС, ПСК і ППЗ).

Таблиця 3.2 – Масив точок

Координата, км	Об'єкт	Струм, А
135,1	ТП	1200
138,6	ЕРС	
143,5	ПСК	
146,1	ЕРС	300
148,0	ЕРС	-800
149,2	ТП	

При введенні даних гілок тягових підстанцій (блок 3) для кожної гілки зазначаються її провідність і ЕРС, рівна напрузі холостого ходу підстанції. При введенні даних гілок живлчих фідерів і тягової мережі (блоки 4 і 5) для кожної гілки вказується тільки її провідність. Оскільки електропоїзди, що знаходяться на ділянці, заміщуються ідеальними джерелами струму, при введенні даних гілок електропоїздів провідність кожної гілки приймається рівною нулю, а величина струму джерела струму приймається рівною струму електропоїзду (блок 6).

У блоці 7 провадиться складання матриці вузлових провідностей і струмів, за якими проводиться електричний розрахунок СТЕ – визначаються потенціали вузлів схеми заміщення СТЕ при виводі струморозподілу електричної енергії. Результати розрахунку заносяться в масив вузлових потенціалів  $\varphi_{рез}(i)$ , де  $i$  – номер вузла.

Коли на ділянці відсутні приймачі надлишкової енергії рекуперації, що виробляється рекуперуючими електропоїздами, енергія передається поїздам, що працюють у тяговому режимі, які беруть струм рекуперації безпосередньо через тягову мережу (якщо вони знаходяться на тій же фідерної зони, що і рекуперуючий поїзд) або через шини підстанцій.

При цьому, якщо напруга на шинах тягової підстанції стає вище її напруги холостого ходу, дана тягова підстанція перестає віддавати електроенергію в СТЕ (тобто як би «закривається») і переходить в режим холостого ходу. Оскільки схема заміщення тягової підстанції при використанні методу вузлових потенціалів являє собою послідовно з'єднані джерело ЕРС і активний опір, а

програмна реалізація ключа не передбачає, струм від шин тягової підстанції, яка працює у випрямному режимі, у даному випадку починає протікати до базового вузла, що по своїй суті являє інвертування електричної енергії з СТЕ в зовнішню енергосистему.

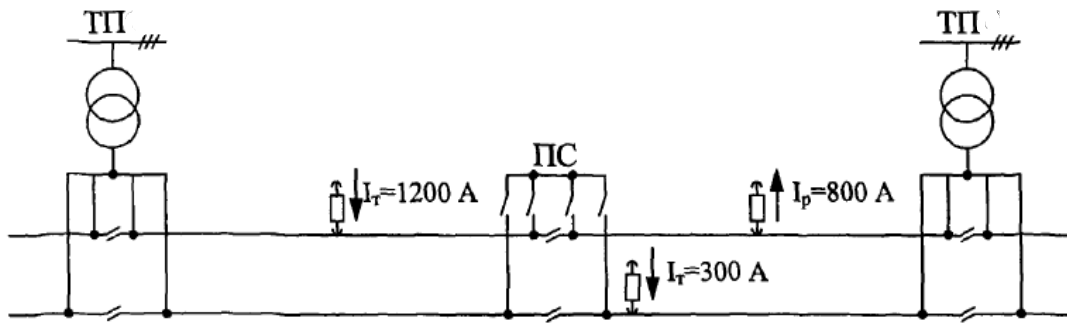
Оскільки розглядаємо струморозподіл в СТЕ, де на ТП відсутні інвертори, то для усунення цієї помилки в блоці 8 виробляється перебір вузлів з'єднання тягових підстанцій, при якому контролюється, щоб потенціал вузла був менше ЕРС гілки підстанції. Якщо ця умова не дотримується (тобто струм спрямований до базового вузла) і при цьому провідність даної гілки не дорівнює нулю (тобто дана підстанція «відкрита»), номер даної підстанції заноситься в масив «закритих» тягових підстанцій, у блоці 9 провідність гілки даної підстанції прирівнюється нулю і розрахунок повторюється (блок 7). Це дозволяє виключити помилки – коли потік потужності прямує від шин підстанції, яка працює у випрямному режимі, до базового вузла.

Для розрахунку струморозподілу тільки енергії рекуперації в блоці 10 проводиться перевизначення даних гілок тягових підстанцій – їх провідність і ЕРС прирівнюються нулю. Це виконується для того, щоб отримати картину споживання рекуперованої електричної енергії поїздами, які перебувають на ділянці в тяговому режимі.

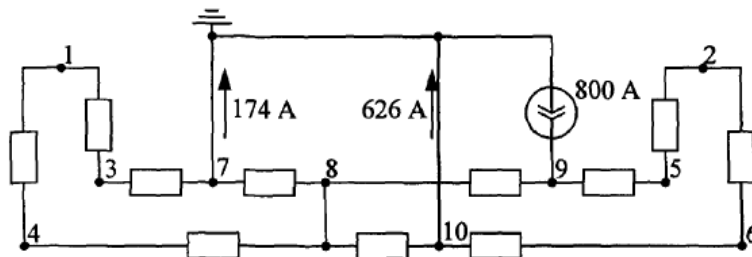
Перевизначення даних віток електропоїздів, які знаходяться на ділянці (блок 11), здійснюється наступним чином (рис. 3., б):

1. З масиву точок вибираються місця підключення електропоїздів – якщо струм електропоїзди більше нуля (тобто він знаходиться в тяговому режимі), то опір даної гілки прирівнюється до нуля;
2. Якщо струм поїзда менше нуля (тобто він знаходиться в режимі рекуперативного гальмування), то провідність даної гілки прирівнюється до нуля, струм джерела струму даної гілки дорівнює струму рекуперації, а значення струму електропоїзда в масиві точок замінюється нулем.





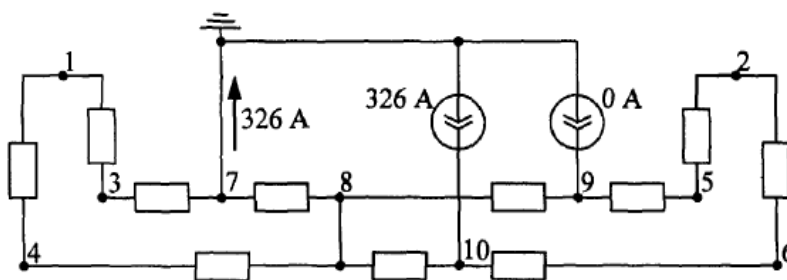
а)



б)

Масив точок

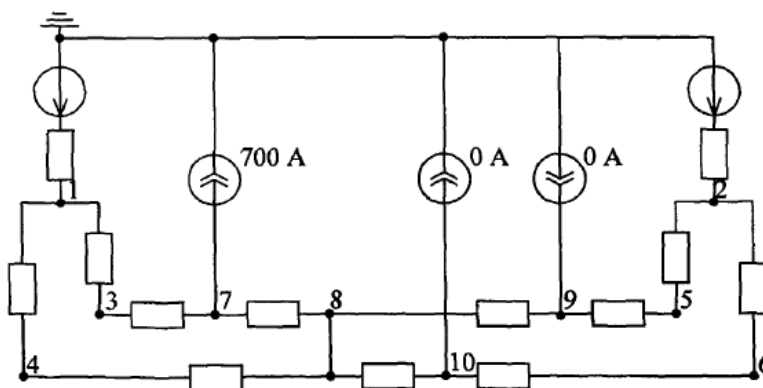
235,1	ТП	
238,6	ЕРС	1200
243,5	ПСК	
246,1	ЕРС	300
248,0	ЕРС	-800
249,0	ТП	



в)

Масив точок

235,1	ТП	
238,6	ЕРС	1026
243,5	ПСК	
246,1	ЕРС	-326
248,0	ЕРС	0
249,2	ТП	



г)

Масив точок

235,1	ТП	
238,6	ЕРС	700
243,5	ПСК	
246,1	ЕРС	0
248,0	ЕРС	0
249,2	ТП	

Рисунок 3.19 – Розрахункова схема (а) і схеми заміщення розрахункової ділянки (б-г) для визначення потенціалів вузлів при розрахунку струморозподілу енергії рекуперації

У блоці 12 проводиться визначення потенціалів вузлів схеми заміщення СТЕ при даній струмового навантаження. Результати розрахунку заносяться в масив вузлових потенціалів  $\varphi'(i)$ , у цьому ж блоці, визначається і заноситься в масив сумарний потенціал кожного вузла схеми заміщення при рекуперації електричної енергії:  $\varphi_{рек}(i) = \varphi_{рек}(i) + \varphi'(i)$ .

У блоці 13 для кожного поїзда з масиву точок (рис. 3.18, в), що перебуває у режимі тяги, проводиться перевизначення його струму – спочатку визначається номер вузла, що відповідає даній точці, потім за відомим номером вузла і відомими провідимостям гілок тягової мережі, визначається струм гілки, що заміщує даний електропоїзд, і отриманий струм віднімається з відповідного значення струму масиву точок.

За уже зміненими даними масиву точок в блоці 14 аналізується наявність на ділянці поїздів, які віддають електричну енергію в тягову мережу, і якщо такі є, то знову здійснюється перерахунок потенціалів всіх вузлів (перехід до блоку 11). Таким чином, перерахунок потенціалів всіх вузлів схеми заміщення СТЕ буде виконуватись до тих пір, поки на ділянці не залишиться жодного рекуперуючого поїзда.

Після завершення розрахунку струморозподілу рекуперированной електроенергії за відомими потенціалами вузлів при підсумковому струморозподілі  $\varphi_{рез}(i)$  і струморозподілу енергії рекуперації  $\varphi_{рек}(i)$  визначають струморозподіл електричної енергії, що надходить в тягову мережу від ТП. Струмозподіл енергії від тягових підстанцій визначається масивом потенціалів вузлів  $\varphi_{тп}(i)$ , значення якого визначаються як різниця значень  $\varphi_{рез}(i)$  і  $\varphi_{рек}(i)$ .

Таким чином, використання алгоритму розрахунку струморозподілу в СТЕ, розробленого на основі методу накладання, дає можливість проводити аналіз струморозподілу рекуперованої електричної енергії та струморозподілу енергії, що надходить в СТЕ з СЗЕ.

Для дослідження ступеня впливу різних факторів на ефективність реалізації рекуперації енергії в системі електричної тяги в умовах обмеженого елект-

роспоживання був проведений аналіз розподілу струмів і напруг у межах однієї і суміжних МПЗ. На рис. 3. наведено схему двоколіїної ділянки електричної тяги постійного струму (3,3 кВ) з роздільним живленням, а також відповідні їм миттєві схеми заміщення на яких знаходяться два потяги, один з яких у режимі тяги (ЕРС 2), а інший в режимі рекуперації (ЕРС 1). Для аналізу усталеного струморозподілу в даній системі електротранспорту поїзні навантаження в режимі споживання і рекуперації представлені у вигляді джерел струму із заданими величинами струмів [224]. Одностороння провідність ТП у схемі рис. 3.7, б враховує відсутність приймачів надлишкової енергії рекуперації в системі електропостачання, що характерно як для більшості ділянок магістрального електрифікованого залізничного транспорту України, так міського електротранспорту та метрополітенів. Для розрахунку усталеного струморозподілу в системі електротяги зручно використовувати чисельні методи на базі рівнянь Кірхгофа, методів контурних струмів або вузлових потенціалів.

Під зоною рекуперації в схемі рис. 3.20 розуміється максимальне значення відстані відповідно

$$L_{\text{рек}} = 2L - x_1 - x_2, \quad (3.32)$$

при якому забезпечується дотримання правої границі співвідношення (1.8), де згідно зі схемою рис.3.3. напруга на струмоприймачі поїзда в режимі рекуперації  $U_c(t)$  являє собою напругу на джерелі струму  $I_{\text{рек}}$ . Ця відстань є функцією кількох змінних

$$L_{\text{рек}} = L_{\text{рек}}(I_{\text{рек}}, I_{\text{тяг}}, U_{\text{ТП}}^{\text{XX}}, x_1, x_2), \quad (3.33)$$

де  $U_{\text{ТП}}^{\text{XX}} = E_{\text{ТП}}$  – напруга холостого ходу на шинах тягових підстанцій, що беруть участь в електропостачанні тягового навантаження.

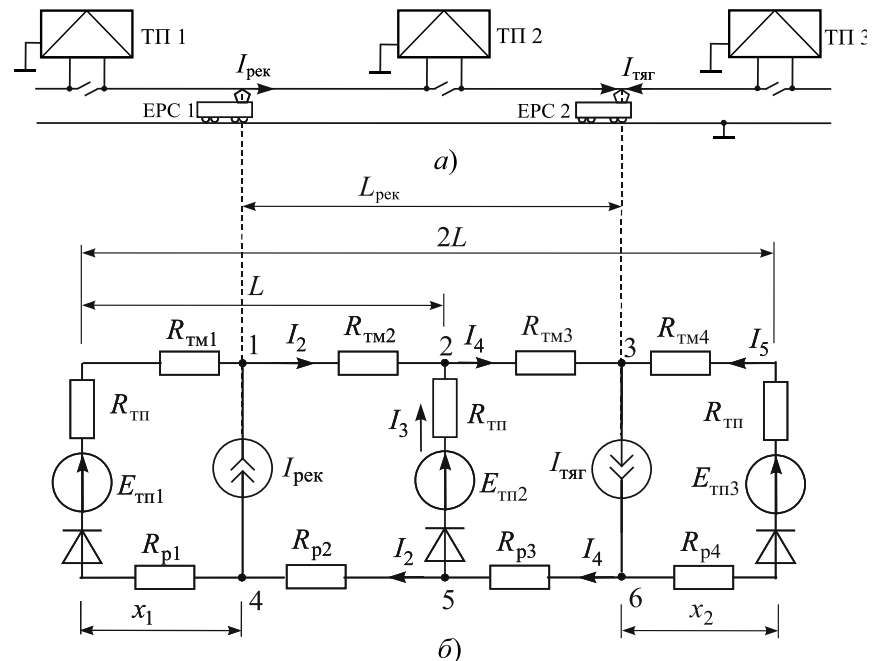


Рисунок 3.20 – Схема живлення контактної мережі суміжних МПЗ (а) і її миттєва схема заміщення (б)

Координати положення поїздів ( $x_1, x_2$ ) визначають ступінь впливу опору тягової мережі системи тягового електропостачання на ефективність передачі рекуперативної енергії до віддалених поїздів в тягових режимах. При значному видаленні поїздів в режимах тяги і рекуперації на струмоприймачі останнього може бути порушено умову (1.8) по верхній межі, тому частина енергії гальмування буде утилізована.

Параметри ділянки наступні [223]: контактна підвіска М120+2МФ100 з питомим опором тягової мережі  $r_{км} = 0,056$  Ом/км; рейки Р65 з питомим опором рейкової мережі  $r_{рм} = 0,0155$  Ом/км; напруги холостого ходу на шинах ТП 1, 2, 3 прийняті однаковими  $E_{ТП1} = E_{ТП2} = E_{ТП3} = 3,3$  кВ; внутрішні опори тягових підстанцій з централізованим живленням однакові і становлять (включаючи опри живлячих і відсмоктуючих фідерів)  $R_{ТП1} = R_{ТП2} = 0,042$  Ом; довжина міжпідстанційних зон  $L = 15$  км.

Будемо вважати, що всі ТП не обладнані пристроями прийому надлишкової енергії рекуперації (інверторами, накопичувачами), що притаманно більшості електрифікованих ділянок, а струм рекуперації ЕРС 1 замикається лише че-

рез коло ЕРС 2 (в зоні рекуперації інших поїздів в режимі тяги немає). В такому випадку, за рахунок однобічної провідності віток з ТП дане миттєве коло є нелінійним, тому його розрахунок виконувався чисельним методом.

В даній роботі на базі багатоваріантних розрахунків миттєвої схеми ділянки електричної тяги було отримано розподіл струмів живлячих ТП при різних положеннях ЕРС в тяговому та рекуперативному режимах та величинах їх струмів. Оцінка ефективності використання енергії рекуперації була виконана в залежності від співвідношення струмів тяги і рекуперації на ділянці  $I_{\text{рек}}/I_{\text{тяг}}$ , що визначає в даний момент часу можливість реалізації струму рекуперації по відношенню до струму тягового споживання на ділянці

При моделюванні різних відстаней між поїздами були визначені залежності напруги на струмоприймачах ЕРС в режимі рекуперації  $U_c^{\text{рек}}(I_{\text{рек}}/I_{\text{тяг}})$  та тяги  $U_c^{\text{тяг}}(I_{\text{рек}}/I_{\text{тяг}})$  (рис. 3.21, а), які підтверджують те, що при збільшенні відстані між ЕРС зменшується ефективність використання рекуперативної енергії, оскільки суттєво зростає напруга на струмоприймачі рекуперативного ЕРС  $U_c^{\text{рек}}$ . Так при відстані між поїздами 15 км рекуперація енергії в мережу стає вже неможливою при струмі, що складає близько 80 % від тягового струму ЕРС 2, тому для утилізації надлишкового рекуперативного струму на ЕРС 1 необхідне застосування паралельної схеми реостатного гальмування. В той же час встановлено, що функція  $U_c^{\text{тяг}}(I_{\text{рек}}/I_{\text{тяг}})$  від відстані між ЕРС не залежить.

Для наведеного прикладу встановлено, що при відстані між поїздами  $L_{\text{рек}} < 9,75$  км є можливість реалізувати рекуперацію з будь яким струмом в межах умови  $(I_{\text{рек}}/I_{\text{тяг}}) \geq 1$ , тому таку відстань можна вважати ефективною зоною рекуперації з прийнятними втратами енергії [225].

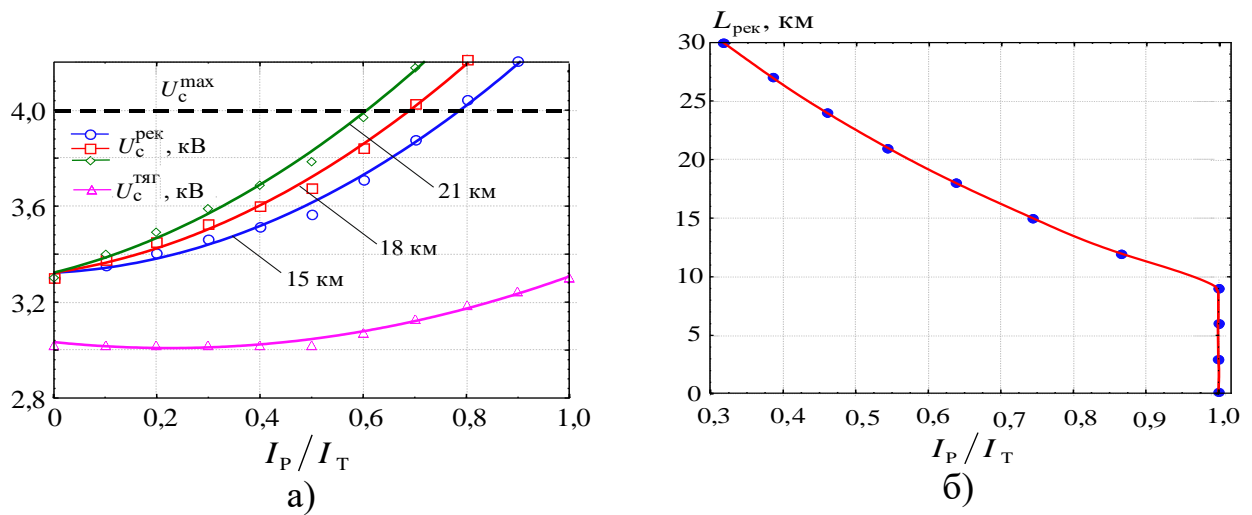


Рисунок 3.21 – Залежності напруги на струмоприймачах (а) та ефективної зони рекуперації (б) від співвідношення  $I_{\text{рек}}/I_{\text{тяг}}$

Для дослідження ефективності режиму рекуперації при наявності НЕ в СТЕ розглянемо одноколійну залізничну ділянку тягової мережі постійного струму (3,3 кВ), що включає три ТП, одна з яких (ТП 2) обладнана НЕ з енергоємністю 300 кВт·год. На розглядуваній ділянці одночасно рухаються два поїзди (рис. 3.22). Розглядається випадок проходження великовагового поїзда 1 обладнаного рекуперацією, за яким слідує легковаговий поїзд 2 без рекуперації. Профіль колії між підстанціями обрано таким, що поїзда на ділянці ТП 1-2 знаходяться в режимі тяги, а ТП 2-3 в режимі гальмування. Режими руху поїздів було обрано такими, що процеси тягового електроспоживання і рекуперації поїздів на суміжних ділянках не співпадають в часі, що є найбільш розповсюдженим випадком, тому всю надлишкову енергії рекуперації необхідно поглинати НЕ. Після виходу поїзда 1 за межі розглядуваної ділянки і входу поїзда 2 на ділянку ТП 2-3, на ділянку ТП 1-2 заходить великоваговий поїзд 3, що споживає енергію за тим же графіком що і поїзд 1. При цьому він частково підживлюється від НЕ. Графіки струмів поїздів, що визначені на основі тягових розрахунків для даної ділянки (ТП 1-3), наведені на рис. 3.23.

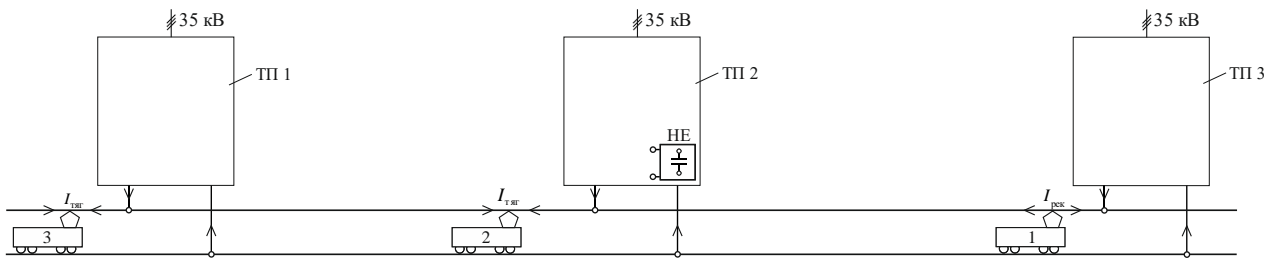


Рисунок 3.22 – Структурна схема ділянки, що моделювалася

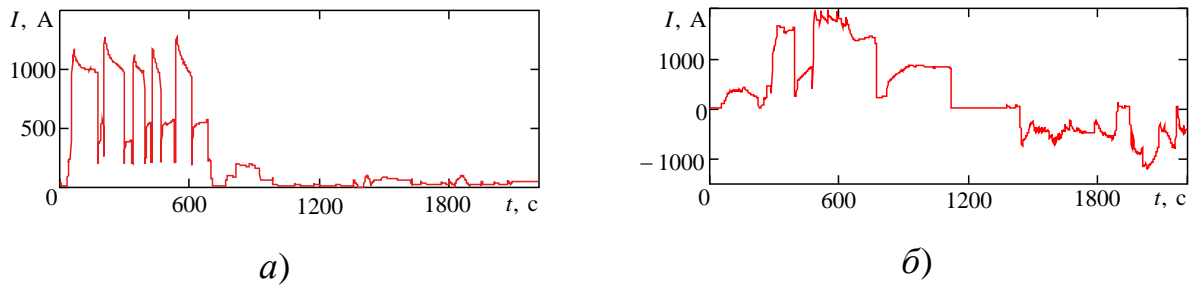


Рисунок 3.23 – Графіки струмів поїздів 2 (а) та 1 і 3 (б)

В результаті моделювання було виконано порівняння витрати енергії по вводу 35 кВ ТП 2 при наявності і відсутності на ній НЕ, а також розглянуто раціональні межі розряду НЕ при підживленні тягового навантаження. Залежність відданої енергії НЕ в процесі його розряду на задане навантаження від залишкової напруги на його затискачах  $U_3$  представлена на рис. 3.15 та визначається виразом

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

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

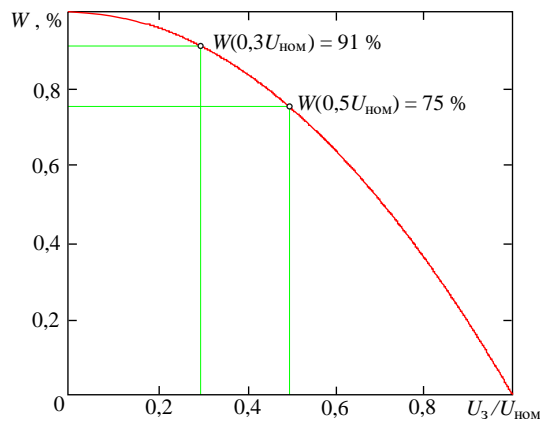


Рисунок 3.24 – Залежність залишкової енергії НЕ при розряді від напруги

Верхня межа інтегралу  $t(U_3)$  визначає час розряду НЕ до значення напруги  $U_3$ . З рис. 3.24 видно, що, наприклад, при розряді НЕ до напруги 50 % від номінального значення, його залишковий запас енергії складає 25 %.

При відсутності тягового електроспоживання в зоні рекуперації і НЕ на ТП 2, вся енергія, що рекуперується при гальмуванні поїзда на ділянці ТП 2-3 буде утилізуватися в його 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 і керування процесом його заряду-розряду за напругою на шинах постійного струму, встановлено, що 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...70 %. Для збільшення економічного ефекту потрібно або підвищувати енергоємність накопичувача або розробляти більш раціональні режими енергообміну.

### **3.5. Аналіз впливу рекуперативного гальмування на витрату електричної енергії за лічильниками тягових підстанцій**

Автоматизовані розрахунки усталеного струморозподілу в СТЕ на базі матричних методів для дослідження ефективності використання енергії рекупера-



ції дозволила підійти до вирішення питань надійності та раціональності застосування рекуперативного гальмування на електрифікованих ділянках постійного струму. Дослідження даних питань було вироблено для ділянок, наближених за умовами до гірського профілю.

Дослідження питання впливу рекуперації електричної енергії на її витрата по лічильникам тягових підстанцій вироблялося для ділянки довжиною 150 км, на якій розташовано 13 тягових підстанцій. Дана ділянка характеризується важкими підйомами від 14 до 31 км з ухилом 6-8 тисячних, знакозмінним профілем, наявністю спряжених кривих, а також нерівномірністю по протяжності міжпідстанційних зон.

У використуваному алгоритмі розрахунку СТЕ матричним методом було виконано два розрахунки функціонування даної ділянки у місячний період (при наявності та за відсутності рекуперації електричної енергії на ділянці). При виконанні розрахунків в алгоритмі було враховано необхідну інформацію про параметри пристроїв електропостачання та режими їх роботи, а також були введені дані, що характеризують існуючі умови експлуатації ділянки. При моделюванні за основу був прийнятий варіант графіка руху, що передбачає строго задані нитки графіка для пропуску пасажирських поїздів і імовірну схему пропуску вантажних поїздів при їх заданих добовому числі і масі.

Результати виконаного імітаційного моделювання представлені в табл. 3.3 та табл. 3.4.

Аналіз виконаних розрахунків показує, що наявність або відсутність рекуперації електроенергії не робить істотного впливу на її споживання поїздами, які перебувають у тяговому режимі. Деяке підвищення середнього значення напруги на струмоприймачах електровозів при наявності на ділянці рекуперації призводить до того, що електровози рухаються по ділянкам з більшою швидкістю і проходять її за менший проміжок часу, до того ж при відсутності рекуперації її витрати на тягу поїздів для різних міжпідстанційних зон збільшується від 0,19 до 38,10 %, а в середньому по ділянці дане збільшення становить 2,88 %.

Таблиця 3.3 – Основні енергетичні показники за міжпідстанційними зонами, отримані за результатами моделювання функціонування розрахункової ділянки

№ МПЗ	При наявності рекуперації			При відсутності рекуперації
	спожита на тягу ЕЕ, тис. кВт-год	рекуперована ЕЕ, тис. кВт-год	споживана енергія рекуперації, тис. кВт-год	спожита на тягу ЕЕ, тис. кВт-год
1	1 813,1	0,0	85,1	1 818,4
2	1 667,6	235,3	222,2	1 755,9
3	2 418,7	543,9	563,2	2 550,3
4	3 071,4	1 292,8	862,1	3 108,4
5	1 084,6	262,6	197,6	1 158,2
6	2 598,3	63,4	356,6	2 657,7
7	1 718,0	318,8	187,2	1 763,0
8	1 648,7	311,8	165,9	1 689,8
9	1 704,1	35,7	144,1	1 707,3
10	2 257,8	84,6	93,4	2 263,3
11	1 981,6	0,0	29,0	1 985,3
12	257,3	0,0	3,4	415,7
Усього по ділянці	22214,2	3148,9	2909,8	22873,3

Обсяг рекуперованої електроенергії в цілому по ділянці складає 14,18 % від усієї електроенергії, спожитої поїздами в тяговому режимі. При цьому для різних міжпідстанційних зон складова енергії, споживана на тягу, яка надходить від електровозів, які перебувають у режимі рекуперативного гальмування, варіює в межах 1,32 - 28,07 %, а середня для всієї ділянки значення даного показника становить 13,10 % (табл. 3.2).

Таким чином, результати розрахунку показують, що хоча рекуперація електроенергії і не чинить значного впливу на споживання електроенергії поїздами, які перебувають на міжпідстанційній зоні в режимі тяги (табл. 3.2), але при цьому значно знижується витрата електроенергії на тягу поїздів за лічильниками тягових підстанцій (табл. 3.3). Так, режим роботи дільниці, коли на ньому не застосовується рекуперативного гальмування, призводить до збільшення витрати електроенергії по лічильникам тягових підстанцій на 0,83 - 33,59 %, а в середньому по ділянці відсутність рекуперації електричної енергії призводить до збільшення її витрати на тягу поїздів за лічильниками тягових підстанцій на 15,71 %.

Таблиця 3.4 – Основні енергетичні показники тягових підстанцій, отримані за результатами моделювання роботи розрахункової ділянки протягом календарного місяця

№ ТП	При наявності рекуперації		При відсутності рекуперації	
	витрата ЕЕ на тягу поїздів, тис. кВт-год	середній струм тягової підстанції, А	витрата ЕЕ на тягу поїздів, тис. кВт-год	середній струм тягової підстанції, А
1	954,4	359	962,4	361
2	1908,5	716	2118,7	795
3	1677,9	630	2084,7	782
4	2094,7	786	3154,4	1184
5	1482,3	556	2220,9	833
6	1909,5	717	2321,9	871
7	1993,4	748	2255,9	846
8	1636,2	614	1928,9	724
9	1625,5	610	1836,5	689
10	2294,9	861	2390,1	897
11	2079,2	780	2142,0	804
12	1080,8	406	1156,0	434
13	354,3	133	449,7	169
Усього	21 091,6		25 022,1	

Обсяг рекуперованої електричної енергії є функцією декількох факторів (профілю шляху, ваги і кількості поїздів на ділянці, нерівномірності руху поїздів та ін.), тому в результаті розрахунку було отримано, що для різних ділянок частка рекуперованої енергії від, витраченої на тягу поїздів енергії, становить від 0,26 до 14,18 %.

В цілому по ділянці 86,0 % всієї рекуперованої електричної енергії, що повертається в СТЕ поїздами на двоколієних ділянках, а ще 8,9 % рекуперується на одноколієних ділянках, на яких є тягові підстанції з приймачами надлишкової енергії рекуперації. В цілому ж по відділенню сумарний обсяг рекуперованої електроенергії становить 7,88 % від електроенергії, витраченої на тягу поїздів за лічильниками тягових підстанцій.

Обсяг рекуперованої на ділянці електроенергії робить істотний вплив на обсяг електроенергії, що витрачається на тягу поїздів, тому відсутність рекуперації призводить до збільшення енерговитрат за лічильниками тягових підстан-

цій для різних ділянок на 0,13...15,71 %, а в цілому по відділенню витрати енергії на тягу поїздів за лічильниками тягових підстанцій при відсутності рекуперації збільшується на 7,33 %.

Таким чином, для розглянутої ділянки, профіль якої рясніє зтяжними підйомами, рекуперативне гальмування є одним з найважливіших джерел економії електричної енергії в СТЕ і одним з найбільш перспективних заходів в області ресурсозберігаючих технологій.

Однією з актуальних проблем на електрифікованих залізницях є проблема підвищеного «небалансу» електричної енергії, що визначається за лічильниками тягових підстанцій і електрорухомого складу. Аналіз помісячної витрати електричної енергії за лічильниками тягових підстанцій і за лічильниками ЕРС показує, що в залежності від місяця звітне значення «небалансу» змінювалося в межах 15,7 - 25,6 %, а в середньому за рік для кожного локомотивного депо дана величина склала близько 20 % (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Витрата ЕЕ по лічильникам ТП і ЕРС і «небаланс» ЕЕ за локомотивним депо

Назва депо	Витрата ЕЕ по лічильникам ТП, тис. кВт-год	Витрата ЕЕ по лічильникам ЕРС тис. кВт-год	«Небаланс» електроенергії	
			абсолютне, тис. кВт-год	відносний, %
РПЧ2	371115	296968	74147	19,98
РПЧ3	109282	87464	21818	19,97
ТЧ1	289553	234509	55044	19,01
ТЧ8	198780	158942	39838	20,04

Величина «небалансу» включає в себе технологічні втрати на транспортування електричної енергії від джерела до споживачів  $\Delta W_{\text{техн}}$  і втрати, зумовлені неточністю визначення  $W_{\text{ТП}}$  і  $W_{\text{ЕРС}}$ , тому для розробки заходів щодо зниження «небалансу» електричної енергії необхідно визначити значення кожної складової даних втрат.

Одна з імовірних причин підвищеного «небалансу» - це вплив енергії рекуперації на збільшення технічних втрат в СТЕ.

Питання впливу рекуперації енергії на технічні втрати в СТЕ досліджувалося з застосуванням прийнятого матричного розрахунку СТЕ постійного струму. Для кожної з дев'яти ділянок розрахунки проводилися при ідентичних графіках руху поїздів для штатного режиму і для режиму, коли на ділянці відсутня рекуперація електроенергії. Розміри вантажного руху та маси вантажних поїздів були прийняті на основі даних, отриманих при обробці виконаних графіків руху. Для обліку кількості пасажирських поїздів і часу їх ходу по дільницях було використано розклад руху пасажирських поїздів та електропоїздів.

При виконанні розрахунку моделювання графіка руху поїздів на даних ділянках проводилося по варіанту, що передбачає імовірну схему пропуску вантажних поїздів і задану схему пропуску пасажирських поїздів та електропоїздів. При отриманні щільності розподілу приросту міжпоїзних інтервалів для вантажних поїздів проводилося кілька розіграшів реалізацій графіка руху поїздів, і для подальшого розрахунку приймалися реалізації графіка, при яких змодельоване число вантажних поїздів для кожного з напрямків відповідало добовим розмірам руху.

Таким чином, при виконанні розрахунків показники роботи системи електропостачання оцінювалися для декількох добових реалізацій графіка руху, а підсумковий результат визначався як середній по окремим значенням, отриманим для того чи іншого показника роботи системи.

Оскільки при рекуперації електроенергії електровоз працює паралельно з енергосистемою, відсутність рекуперації призводить до збільшення витрати енергії, що відпускається з шин тягових підстанцій, що в свою чергу веде до збільшення технічних втрат в обладнанні тягових підстанцій (табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Технічні втрати в обладнанні тягових підстанцій за результатами моделювання роботи ділянок

№ ділянки	Втрати ЕЕ в обладнанні ТП, кВт год		Зниження втрат в обладнанні ТП при наявності рекуперації ЕЕ	
	штатний режим	без рекуперації	абсолютна, кВт-год	відносна, %
1	3 311 645	3 594 082	282 437	8,53
2	161 257	138 956	-22 302	-13,83
3	663 461	661 964	1 497	0,23
4	672 878	671 965	913	0,14
5	905 675	909 653	3 978	0,44
6	1 446 057	1 452 335	6 278	0,43
7	5 972 276	6 956 024	983 748	16,47
8	1 157 087	1 057 807	-99 280	-8,58
9	1 430 727	1 431 530	803	0,06

Збільшення технічних втрат в обладнанні тягових підстанцій на розрахункових ділянках (при наявності рекуперації ЕЕ) пов'язане з урахуванням втрат при роботі тягових підстанцій в інверторному режимі.

Результати виконаного розрахунку показали, що хоча відсутність рекуперації і веде до збільшення витрати електроенергії на тягу поїздів за лічильниками тягових підстанцій, втрати в фідерах ТП мають не настільки значне прирощення, як втрати в обладнанні ТП (табл. 3.7), а в деяких випадках втрати у фідерах ТП навіть збільшуються при наявності на ділянці рекуперації енергії. Основною причиною цього є збільшення перетоків енергії через шини тягових підстанцій.

Збільшення перетоків електричної енергії через шини тягових підстанцій при наявності рекуперації електроенергії також є основною причиною збільшення технічних втрат в тяговій мережі (табл. 3.7).

Таблиця 3.7 – Технічні втрати в фідерах тягових підстанцій за результатами моделювання роботи ділянок за рік

№ ділянки	Втрати ЕЕ в фідерах ТП, кВт год		Збільшення (+) / зниження (-) втрат у фідерах ТП при наявності рекуперації ЕЕ	
	штатний режим	без рекуперації	абсолютна, кВт-год	відносно, %
1	945 788	956 446	-10 658	-1,13
2	181 332	180529	+803	+0,44
3	232 578	231 958	+621	+0,27
4	339 304	337 041	+2 263	+0.67
5	623 347	617 544	+5 804	+0,93
6	403 179	397 631	+1 825	+0,30
7	2 769 985	397 631	+5 548	+1,38
8	313 645	2 900 071	-130 086	-4,70
9	613 273	287 146	+26 499	+8,45

Таким чином, детальний аналіз структури втрат електроенергії показує, що рекуперація енергії на електрифікованих ділянках призводить до зниження втрат в обладнанні тягових підстанцій та в деяких випадках до зниження втрат в фідерах тягових підстанцій, але оскільки домінуючими є втрати в тяговій мережі, а вони у зв'язку із збільшенням перетоків енергії через шини ТП (при рекуперації) також збільшуються, сумарні технічні втрати в штатному режимі стають більше сумарних технічних втрат при відсутності рекуперації (табл. 3.8).

Таблиця 3.8 – Технічні втрати в тяговій мережі за результатами моделювання роботи ділянок за рік

№ ділянки	Втрати ЕЕ в тяговій мережі, кВт год		Збільшення втрат в тяговій мережі при наявності рекуперації ЕЕ	
	штатний режим	без рекуперації	абсолютна, кВт-год	відносно, %
1	945 788	956 446	-10 658	-1,13
2	181 332	180529	+803	+0,44
3	232 578	231 958	+621	+0,27
4	339 304	337 041	+2 263	+0.67
5	623 347	617 544	+5 804	+0,93
6	403 179	397 631	+5 548	+1,38
7	2 769 985	2 900 071	-130 086	-4,70
8	313 645	287 146	+26 499	+8,45
9	613 273	611448	+1 825	+0,30

На підставі результатів розрахунку основних показників роботи розглянутих ділянок можна зробити наступні висновки:

- наявність рекуперації призводить до збільшення відносних технічних втрат на всіх розрахункових ділянках (в середньому на 0,43 %);
- найбільший вплив рекуперація здійснює на технічні втрати дільниць, оснащених інверторними агрегатами (в штатному режимі відносно збільшення технічних втрат становить 4,07...7,02 %);
- найбільші значення відносних технічних втрат в основному відповідають однокільним ділянкам, на яких відсутні приймачі надлишкової енергії рекуперації.

Таким чином, відносна величина технічно пояснюваного небалансу електроенергії, отримана розрахунковим шляхом, становить 8,71 %, що значно менше звітного значення небалансу електричної енергії в межах балансових належностей залізниць (близько 20 %). Тому основні заходи щодо зниження небалансу повинні бути спрямовані на дослідження структури і зниження величини комерційних втрат, тобто втрат, зумовлених несанкціонованим втручанням в роботу приладів обліку, їх високою похибкою, невідповідністю показань лічильників оплаті за електроенергію та іншими причинами у сфері організації контролю за споживанням електричної енергії.

### **Висновки до розділу 3**

1. 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.

2. Виконано аналіз струморозподілу рекуперованої електричної енергії та струморозподілу енергії, що надходить в СТЕ з зовнішньої енергосистеми, що



дозволило дослідити ефективність використання енергії рекуперації та вплив рекуперації на основні показники роботи СТЕ.

3. Визначена ефективна зона рекуперації в функції коефіцієнта споживання, при якій забезпечується стійкий генераторний струм ЕРС при обмеженні максимальної напруги на струмоприймачі у всьому діапазоні співвідношень струмів тяги та рекуперації. В результаті встановлено, що на відстані між поїздами  $2L$  за рахунок значного опору тягової мережі при великому віддаленні поїздів в мережу можливо рекуперувати струм лише трохи більше 30 % від струму поїзда в режимі тяги, що знаходиться на суміжній фідерній зоні.

4. 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 результаті 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.

5. Виконані розрахунки впливу рекуперації на технічні втрати в СТЕ показали, що наявність на ділянці рекуперативного гальмування призводить до зниження втрат в обладнанні тягових підстанцій та в деяких випадках до зниження втрат в фідерах тягових підстанцій, але оскільки домінуючою складовою втрат є втрати в тяговій мережі, а вони у зв'язку із збільшенням перетоків електричної енергії через шини тягових підстанцій при рекуперації також збільшуються, сумарні технічні втрати в штатному режимі стають більше сумарних технічних втрат при відсутності рекуперації електроенергії.

**Матеріали розділу опубліковано в [224, 225, 226].**

## РОЗДІЛ 4

### РОЗВИТОК ПРИНЦИПІВ НЕЧІТКОГО УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ

#### 4.1. Конструкційно-продукційне моделювання зони розподілу енергії рекуперації транспортних засобів

Розв'язок задачі раціонального розподілу надлишкової енергії рекуперації в СТЕ передбачає при відсутності на ділянках поїздів зустрічного або попутного прямування, здатних повністю спожити виділену енергію рекуперації, тимчасово акумулювати її в накопичувачах [226] або передати в живлячу мережу СЗЕ. Такі можливості, як правило, на даний момент відсутні на вітчизняному транспорті. Дослідження доцільності їх використання на різних ділянках енергопостачання є нагальним завданням енергозбереження.

При відсутності строгої математичної моделі для вирішення завдання раціонального використання енергії рекуперації пропонується застосування нейронечітких моделей [227-229], які включають в себе штучні нейронні мережі, експертні системи і нечітку логіку [233-241]. Такі моделі отримали широке поширення в різноманітних прикладних задачах розпізнавання і управління [238-240, 245, 246, 248], в тому числі в електротехнічних системах [249-253].

Перешкодою для такого моделювання (і ще більшою мірою для побудови строгих математичних моделей) є значне різноманіття потенційних можливостей обладнання ділянок тягового енергопостачання. Для моделювання широкого спектру існуючого і потенційного обладнання ділянок рекуперації пропонується використовувати апарат математико-алгоритмічного конструювання (МАК) [242].

Це дасть можливість на основі експертних рішень для змодельованих методами МАК структурних схем різної комплектації електрообладнання та поїзних ситуацій навчити нейрофазі мережі для керування системами енергопоста-

чання з метою раціонального використання енергії рекуперації. Надалі можливе отримання узагальнюючих керувань.

Задача полягає у розробці засобів і методів формування множин реальних і потенційних структурних схем зон рекуперації з різними поїзними ситуаціями для подальшого навчання нейрофазі мереж (на основі експертних рішень) і формуванні раціонального керування.

Розвиток даної методології являє собою одну з важливих частин пропонованої технології управління системами тягового електропостачання з метою раціонального використання енергії рекуперації. А саме: розробка засобів і методів формування множини реальних і потенційних структурних схем зон рекуперації з різними поїзними ситуаціями для подальшого навчання нейрофазі мереж (на основі експертних рішень) і формуванні раціонального управління.

Основою для розробки відповідних методів є теоретичні положення МАК і конструктивно-продукційні структури.

Узагальненою конструктивно-продукційною структурою (УКПС) називається трійка [242]:

$$C_G = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle, \quad (4.1)$$

де  $M$  – неоднорідний носій структури,  $\Sigma$  – сигнатура, що складається з множин операцій зв'язування, підстановки і висновку, операцій над атрибутами і відносини підстановки,  $\Lambda$  – конструктивна аксіоматика. Аксіоматика  $\Lambda$  повністю представлена в [242].

Призначення конструкційно-продукційної структури (КПС) полягає у формуванні множин конструкцій з допомогою операцій зв'язування, підстановки, виводу та ін. операцій, що задаються правилами аксіоматики.

У даній роботі під конструкціями розуміються структурні схеми системи тягового електропостачання в зоні розподілу енергії рекуперації з відповідними поїзними ситуаціями.

Для формування конструкцій необхідно виконувати ряд уточнюючих перетворень ОКПС [242]:

- спеціалізація визначає предметну область: семантичну природу носія, кінцеву множину операцій та їх семантику, атрибутику операцій, порядок їх виконання і обмеження на правила підстановки;
- інтерпретація полягає у зв'язуванні сигнатури операцій з алгоритмами виконання деякої алгоритмічної структури [242]. При інтерпретації виконується зв'язування інформаційної моделі способу побудови конструкцій та моделі виконавця;
- конкретизація КПС полягає в розширенні аксіоматики множиною правил продукцій, завданні конкретних множин нетермінальних і термінальних символів з їх атрибутами і, при необхідності, значень атрибутів;
- реалізація КПС полягає у формуванні конструкції з елементів носія КПС шляхом виконання алгоритмів, пов'язаних з операціями сигнатури. Реалізація можлива тільки для попередньо спеціалізованої, інтерпретованої і конкретизованої КПС.

Наведемо основні поняття конструктивно-продукційних структур. Згідно аксіоматики УКПС формою  ${}_w l$  з атрибутом  $w$  називається набір терміналів і нетерміналів, що об'єднуються операціями зв'язування. Конструкцією називається форма, що містить тільки термінали [242].

Правила підстановки мають вид  $\Psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi$ , де  $s_r$  – відносини підстановки,  $g_r$  – набір операцій над атрибутами. Відношення підстановки – двомісне відношення з атрибутами  ${}_{w_i} l_i \rightarrow {}_{w_j} l_j$  [242]. Для форми  ${}_{w_l} l_l = {}_{w_0} \oplus ({}_{w_1} l_1, {}_{w_2} l_2, \dots, {}_{w_h} l_h, \dots, {}_{w_k} l_k)$  і доступного відносини підстановки  ${}_{w_h} l_h \rightarrow {}_{w_q} l_q$  такого, що  ${}_{w_h} l_h \prec {}_{w_l} l_l$  ( ${}_{w_h} l_h \in$  частиною  ${}_{w_l} l_l$ ), результатом тримісної операції підстановки  ${}_{w_p} \Rightarrow ({}_{w_h} l_h, {}_{w_q} l_q, {}_{w_l} l_l)$  буде форма  ${}_{w_l^*} l_l^* = {}_{w_0} \oplus ({}_{w_1} l_1, {}_{w_2} l_2, \dots, {}_{w_q} l_q, \dots, {}_{w_k} l_k)$ , де  $\oplus$  – будь-яка операція зв'язування з  $\Sigma$ .

Операція часткового висновку полягає у:

- виборі одного з доступних правил підстановки  $\Psi_r : \langle s_r, g_r \rangle \in \Psi$ , з відношеннями підстановки  $s_r$  і виконанні на його основі операцій підстановки;
- виконання операцій над атрибутами  $g_r$ .

Форми, що отримуються в результаті операцій часткового виведення починаючи з початкового нетерміналу є сентенціальними.

Операція повного висновку (або просто висновку) полягає у послідовному виконанні операції часткового висновку, починаючи з початкового нетерміналу, і закінчуючи конструкцією.

Моделювання раціональної зони розподілу енергії рекуперації, виконано для системи тягового електропостачання, що може включати один або декілька суміжних ділянок тягової мережі з підстанціями, обладнаних чи ні накопичувачем електроенергії і можливістю передачі електроенергії на систему зовнішнього електропостачання.

#### 4.1.1. Спеціалізована конструктивно-продукційна модель зони рекуперації

Визначимо спеціалізацію ОКПС – конструктор моделі (структурної схеми) системи тягового електропостачання і електричної тяги в зоні розподілу енергії рекуперації:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle_s \mapsto C_{ZR} \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_{ZR} \rangle, \quad (4.2)$$

де  $\Lambda_{ZR} = \Lambda \cup \Lambda_1 \cup \Lambda_2$ ,  $\Lambda_1 = \{M_{ZR} \supset T_1 \cup N_1, \Sigma_{ZR} = \{\Xi, \Theta, \Phi\}, \Xi = \{^{\cdot^2}, \cdot^2, \times^2\}, \Phi = \{\triangleright^1, \triangleleft^2\}, \Theta = \{\Rightarrow, |\Rightarrow, ||\Rightarrow\}\}$  – множини:  $\Xi$  – відношень (і відповідних операцій) зв'язування елементів конструкцій,  $\Phi$  – операцій над атрибутами,  $\Theta$  – операцій виведення,  $T_1, N_1$  – терміналів і нетерміналів.


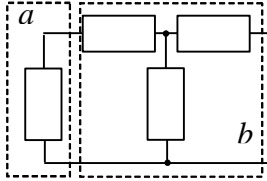
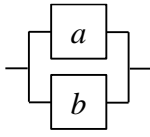
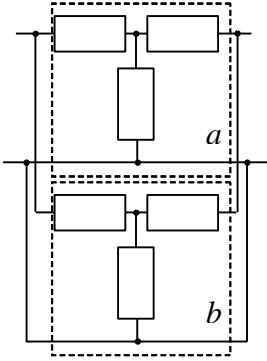
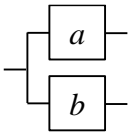
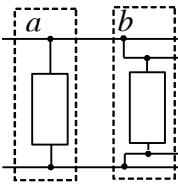
Часткова аксіоматика  $\Lambda_2$  містить такі визначення, доповнення та обмеження, які уточнюють алфавіт, атрибути носія, відношення підстановки, задають особливості виконання операцій підстановки і виведення.

Термінальним алфавітом  $T_1$  є множина елементів системи тягового енергопостачання, споживання і перетворення електроенергії в мережі постійного струму залізниць, трамвайних та тролейбусних ліній і метрополітенів з їх істотними для даного завдання властивостями – атрибутами. Елементи будемо позначати малими латинськими символами, наприклад,  $a$  – термінал  $a$  з атрибутом  $x$ ,  $x \dashv a$  – атрибут  $x$  терміналу  $a$ .

Нетермінальний алфавіт  $N_1 = \{\alpha_i\}$  складається з множини допоміжних символів з атрибутами, які охоплюють грецькими буквами.

Відносини і операції зв'язування з  $\Xi$  задають послідовне і паралельне з'єднання елементів електричного кола (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Відповідність операцій та схем

Операція	Структурна схема	Електрична схема
$a \cdot b$		
$a : b$		
$a \times b$		

Операція над атрибутами:  $\triangleright(x)$  (або  $\triangleright_x$ ), дозволяє задати значення атрибута  $x$ . Ця операція виконується спільно внутрішніми зовнішніми виконавця-

ми. Зовнішній виконавець (вимірювально-комунікаційна система або експерт) передає дані, внутрішній – приймає. Операція  $\langle (id \downarrow y, x \downarrow y) \rangle$  дозволяє отримати значення атрибута  $x$  елементу  $y$  з ідентифікатором  $id$ .

У загальному випадку операції не мають властивостей асоціативності і комутативності, тобто  $(a \oplus b) \oplus c \neq a \oplus (b \oplus c)$ , де  $a, b, c \in N_1 \cup T_1$ , а  $\oplus$  – будь-яке відношення зв'язування з  $\Xi$ . Тому, для однозначного визначення порядку виконання операцій зв'язування будуть застосовуватися дужки. У тих окремих випадках, де виконується асоціативність дужки можуть бути опущені.

#### 4.1.2. Модель виконавця конструювання

Інтерпретація КПС на підставі алгоритмічної структури полягає в розширенні аксіоматики:  $\forall \circ \in \Sigma$  задається  $(A|_X^Y \downarrow \circ)$ , тобто операції  $\circ$  присвоюється значення атрибута  $y$  вигляді  $A|_X^Y$  – алгоритму деякої базової алгоритмічної структури  $C_A$ , таким чином операції з сигнатури  $\Sigma$  зв'язуються з алгоритмами виконання

$$\langle C_{ZR} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_{ZR} \rangle, C_A = \langle M_A, \Sigma_A, \Lambda_A \rangle \rangle_I \mapsto C_{ZRI} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_3, Z \rangle, \quad (4.3)$$

де  $M_A \supset \bigcup_{A_i^0 \in V_A} (X(A_i^0) \cup Y(A_i^0))$  – носій алгоритмічної структури,  $\Sigma_A$  – множина операцій зв'язування алгоритмів (в [243] визначені операції композиції і умовного виконання),  $\Lambda_A$  – аксіоматика алгоритмічної структури (типова аксіоматика приведена в [243]),  $V_A = \{A_i^0|_{X_i}^Y\}$  – множина утворюючих алгоритмів базової алгоритмічної структури (множина елементарних алгоритмів, що реалізуються деяким виконавцем),  $V_A \subset M_A$ ;  $X_i, Y_i$  – множина визначення і значень алгоритму  $A_i^0|_{X_i}^Y$ ,  $\Lambda_3 = \Lambda_{ZR} \cup \Lambda_4$ ,  $\Lambda_4 = \{(A_i|_{X_i}^Y \downarrow \otimes_i) : \forall \otimes_i \in \Sigma, A_i|_{X_i}^Y \in \Omega(C_A)\}$ ,  $i = 1..i_{end}$ ,  $i_{end}$  – кількість операцій в  $\Sigma$ ,  $\Omega(C_A)$  – множина алгоритмів, які конструюються в  $C_A$ .

При інтерпретації виконується зв'язування інформаційної моделі способу побудови конструкцій і моделі виконавця.

Термінали можуть інтерпретуватися подвійно. Якщо реалізація КПС  $C_{ZR}$  – реальна зона розподілу енергії рекуперації, то термінали – елементи системи електропостачання з їх технічними характеристиками, а якщо реалізація КПС  $C_{ZR}$  – модель зони розподілення енергії рекуперації, то термінали – умовні позначення відповідних елементів системи.

#### 4.1.3. Конкретизація конструктивно-продукційної моделі

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

$$C_{ZRI} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_3, Z \rangle_K \mapsto C_{ZRIC} = \langle M_{ZR}, \Sigma_{ZR}, \Lambda_5, Z \rangle, \quad (4.4)$$

де  $\Lambda_5 = \Lambda_5 \cup \Lambda_6$ .

Часткова аксіоматика  $\Lambda_6$  містить такі доповнення.

Термінали алфавіту  $T_1$ :

- $U_{ES} rp$  – зовнішня система електропостачання з атрибутом  $U_{ES}$  – рівень входного напруги системи тягового електропостачання;
- $\eta, k, U_{in}, U_{out} tr$  – понижуючий трансформатор з атрибутами  $\eta$  – ККД,  $k$  – коефіцієнт трансформації,  $U_{in}, U_{out}$  – первинна і вторинна напруги;
- $\eta, U_{in}, U_{out} vipr$  – випрямляч з відповідними атрибутами;
- $\eta, U_{in}, U_{out} inv$  – інвертор;
- $\eta, W, W_{max} nak$  – накопичувач електроенергії з атрибутами  $W, W_{max}$  – накопичена і максимальна електрична ємність;



- $_{\rho, L, \bar{X}, n} put$  – тягова мережа з атрибутами:  $L$  – довжина ділянки,  $\rho$  – питомий опір мережі,  $\bar{X}$  – вектор розмірності  $n$ , що визначає структуру мережі (схема живлення, наявність перемикок на багатоколійних ділянках і т. ін.);
- $_{v, l, P} eps$  електрорухомий склад з атрибутами  $l$  – положення на міжпідстанційній зоні,  $P$  – споживана / генерована потужність;
- $_{\eta, U_{in}, U_{out}, \bar{U}, n} rn$  – регулятор вихідної напруги випрямляча,  $\bar{U}$  – вектор розмірності  $n$ , кожен елемент якого  $u_i$  – регульовані рівні вихідної напруги;
- $x$  – перемикач.

Крім зазначених вище атрибутів всі термінали мають ідентифікуючий атрибут  $id$ , який дозволяє однозначно визначити конкретне обладнання системи електропостачання.

Нетермінальний алфавіт  $N_1$  складається з допоміжних елементів  $N_1 = \{\sigma, \alpha, \beta, \delta, \gamma, \theta, \lambda\}$ . Початковий нетермінал –  $\sigma$ .

Аксиоматика  $\Lambda_6$  містить наступні правила продукцій. Перше правило містить відношення, що зв'язує ділянку тягової мережі, для якої приймається рішення про управління енергією рекуперації з двома живлячими підстанціями:

$$\psi_1 = \langle s_1 = \langle \sigma \rightarrow \alpha \times \beta \times \alpha \rangle, g_1 = \langle \rangle \rangle. \quad (4.5)$$

Правило  $\psi_2$  дозволяє доповнити модель наступною (сусідньою) ділянкою (ітеративно декількома ділянками):

$$\psi_2 = \langle s_2 = \langle \alpha \rightarrow \alpha \times (\beta \times \alpha) \rangle, g_2 = \langle \rangle \rangle. \quad (4.6)$$

Наступне правило дозволяє моделювати колійне розгалуження з відповідною тяговою мережею і підстанціями:

$$\psi_3 = \langle s_3 = \langle \alpha \rightarrow (\beta \times \alpha) \times (\beta \times \alpha) \rangle, g_3 = \langle \rangle \rangle. \quad (4.7)$$

де  $\psi_4$  – допоміжне правило для обладнання тягової підстанції

$$\psi_4 = \langle s_4 = \langle \alpha \rightarrow \delta \times \gamma \rangle, g_4 = \langle \rangle \rangle. \quad (4.8)$$

Правило  $\Psi_5$  призначене для включення накопичувача енергії з перемикачем в моделі тягової підстанції,  $\Psi_6$  – альтернатива правилу  $\Psi_5$ : підстанція накопичувачем не обладнана:

$$\Psi_5 = \left\langle s_5 = \left\langle \delta \rightarrow_{\eta, W, W_{\max}} nak \cdot sw \right\rangle, g_5 = \left\langle \triangleright id, \triangleright \eta, \triangleright W_{\max} \right\rangle \right\rangle, \quad (4.9)$$

$$\Psi_6 = \left\langle s_6 = \left\langle \delta \rightarrow \varepsilon \right\rangle, g_6 = \left\langle \right\rangle \right\rangle. \quad (4.10)$$

Символ  $\varepsilon$  – порожньо, позначає відсутність з'єднання на структурній та електричній схемах.

Правила  $\Psi_7$  і  $\Psi_8$  дозволяє включити в схему тягової підстанції живлення від зовнішньої енергосистеми і понижуючий трансформатор:

$$\Psi_7 = \left\langle s_7 = \left\langle \gamma \rightarrow_{U_{ES}} rp \cdot_{\eta, U_{in}, U_{out}} tr \cdot (\theta : \lambda) \right\rangle, g_7 = \left\langle \triangleright id, \triangleright \eta, \triangleright U_{\min}, \triangleright U_{\max} \right\rangle \right\rangle, \quad (4.11)$$

$$\Psi_8 = \left\langle s_8 = \left\langle \gamma \rightarrow (\theta : \lambda) \cdot_{\eta, U_{in}, U_{out}} tr \cdot_{U_{ES}} rp \right\rangle, g_8 = g_7 \right\rangle. \quad (4.12)$$

Два альтернативних правила  $\Psi_9$  і  $\Psi_{10}$  дозволяють включити в структурну схему випрямляч з регулятором вихідної напруги ( $\Psi_9$ ) або без останнього ( $\Psi_{10}$ ):

$$\Psi_9 = \left\langle s_9 = \left\langle \theta \rightarrow_{\eta, U_{in}, U_{out}} vipr \right\rangle, g_9 = \left\langle \triangleright id, \triangleright \eta \right\rangle \right\rangle, \quad (4.13)$$

$$\Psi_{10} = \left\langle s_{10} = \left\langle \theta \rightarrow_{\eta, U_{in}, U_{out}} vipr \cdot_{\eta, U_{in}, U_{out}, \bar{U}, n} rn \right\rangle, g_{10} = \left\langle \triangleright id, \triangleright \eta, \triangleright n, \triangleright \bar{U} \right\rangle \right\rangle. \quad (4.14)$$

Альтернативні правила  $\Psi_{11}$  і  $\Psi_{12}$  дозволяють включити в структурну схему інвертор з перемикачем ( $\Psi_{11}$ ) або без обох ( $\Psi_{12}$ ):

$$\Psi_{11} = \left\langle s_{11} = \left\langle \lambda \rightarrow_{\eta, U_{in}, U_{out}} inv \cdot x \right\rangle, g_{11} = \left\langle \triangleright id, \triangleright \eta \right\rangle \right\rangle, \quad (4.15)$$

$$\Psi_{12} = \langle s_{12} = \langle \lambda \rightarrow \varepsilon \rangle, g_{12} = \langle \rangle \rangle. \quad (4.16)$$

Правило дозволяє моделювати електропостачання багатокільонних ділянок

$$\Psi_{13} = \langle s_{13} = \langle \beta \rightarrow \beta : \beta \rangle, g_{13} = \langle \rangle \rangle \quad (4.17)$$

і з можливими перемичками на ділянці

$$\Psi_{14} = \langle s_{14} = \langle \beta \rightarrow \beta \cdot \beta \rangle, g_{14} = \langle \rangle \rangle. \quad (4.18)$$

Правило  $\Psi_{15}$  дозволяє замінити нетермінал  $\beta$  на ділянку тягової мережі, а  $s_{16}$  і  $s_{17}$  – на ділянку тягової мережі:

$$\Psi_{15} = \langle s_{15} = \langle \beta \rightarrow \text{п,р,L,}\bar{x},n \text{ put} \rangle, g_{15} = \langle \triangleright id, \triangleright l, \triangleright \rho \rangle \rangle. \quad (4.19)$$

#### 4.1.4. Реалізація конкретної моделі зони рекуперації

В результаті виведення на підставі правил підстановки з урахуванням аксіомати спеціалізованої КПС  $C_{ZR}$  може бути реалізовано нескінченну кількість моделей зон рекуперації, включаючи моделі всіх існуючих і проєктованих.

Розглянемо виведення моделі (у вигляді структурної схеми) однієї з таких зон рекуперації, що представлено на рис. 4.1 [255, 256].

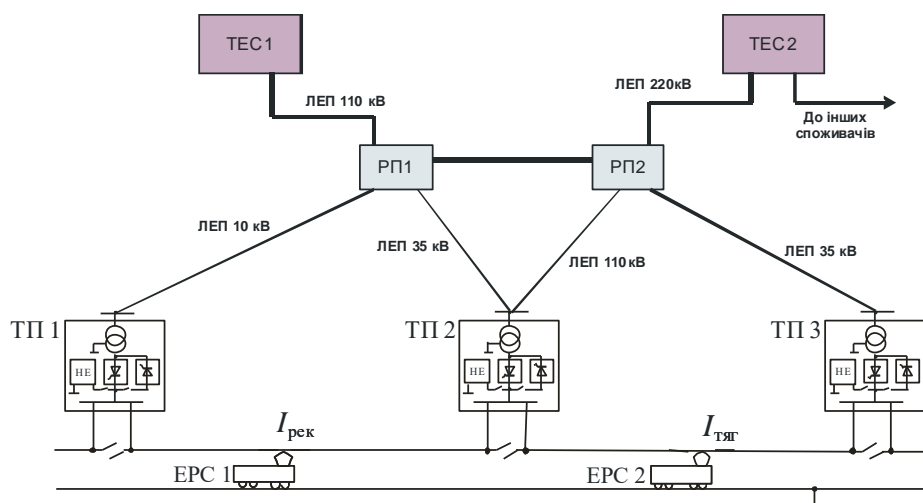


Рисунок 4.1 – Структурна схема зони рекуперації

В результаті операції часткового виведення ( $\sigma \mid \Rightarrow l_1$ ) з вибором правила підстановки  $\Psi_1$  буде сформована сентенціальна форма  $l_1 = \alpha \cdot \beta \cdot \alpha$  відповідна їй структурна схема, представлена на рис. 4.2.



Рисунок 4.2 – Структурний подання сентенціальної форми  $l_1$

Продовжуючи підстановку  $l_1 \mid \Rightarrow l_2$ , із застосуванням правила  $S_2$ , отримаємо сентенціальну форму  $l_2 = \alpha \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot \alpha))$  і структурну схему, з заляченими заготовками двох ділянок тягової мережі і трьох тягових підстанцій (рис. 4.3).

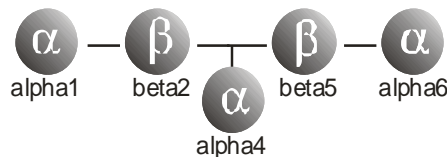


Рисунок 4.3 – Структурний подання сентенціальної форми  $l_2$

Застосування правила  $S_3$  при підстановці  $l_2 \mid \Rightarrow l_3$  дозволяє отримати  $l_3 = \alpha \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$  і структурну схему, в якій закладено розгалуження шляху (з контактною мережею), живиться окремими тяговими підстанціями (рис. 4.4).

Продовжуючи підстановки ( $l_3 \mid \Rightarrow l_4$ ) за правилом  $S_4$  отримаємо  $l_3 = (\delta \times \gamma) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$  і структурну схему з основами конфігурації електрообладнання на одній з тягових підстанцій (рис. 4.4).

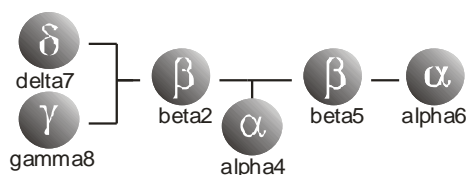


Рисунок 4.4 – Структурний подання сентенціальної форми  $l_4$

Подальша підстановка  $l_4 \mid\Rightarrow l_5$  за правилом  $s_5$  дозволяє отримати  $l_5 = ((e \cdot x) \times \gamma) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$  з додаванням в структурну схему на рис. 4.4 накопичувача електроенергії на відповідній тяговій підстанції (рис. 4.5).

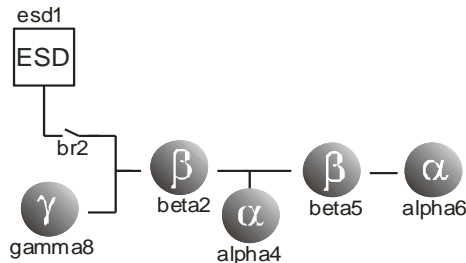


Рисунок 4.5 – Структурне подання сентенціальної форми  $l_5$

Застосування правила  $s_7$  при підстановці  $l_5 \mid\Rightarrow l_6$  дозволяє отримати  $l_6 = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot (\theta : \lambda)) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$ . Структурна схема на рис. 4.5 доповнена обладнанням для передачі надлишкової енергії рекуперації в зовнішню мережу живлення від відповідної тягової підстанції (рис. 4.6).

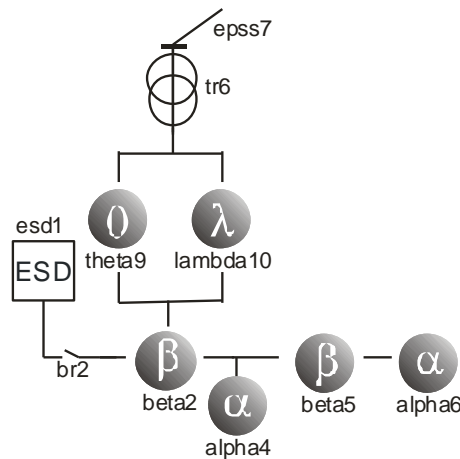


Рисунок 4.6 – Структурне подання сентенціальної форми  $l_6$

Послідовне застосування правил  $s_{10}$  і  $s_{11}$  при підстановках  $l_6 \mid\Rightarrow l_7 \mid\Rightarrow l_8$  дозволяють отримати  $l_8 = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot ((c \cdot h) : (d \cdot x))) \cdot \beta \cdot (\alpha \times (\beta \cdot (\beta \cdot \alpha) \times (\beta \cdot \alpha)))$ . За структурною схемою рис. 4.6 завершена комплектація обладнання відповідної підстанції інвертором і регулятором напруги. Структурна схема цієї тягової підстанції повністю сформована (рис. 4.7).

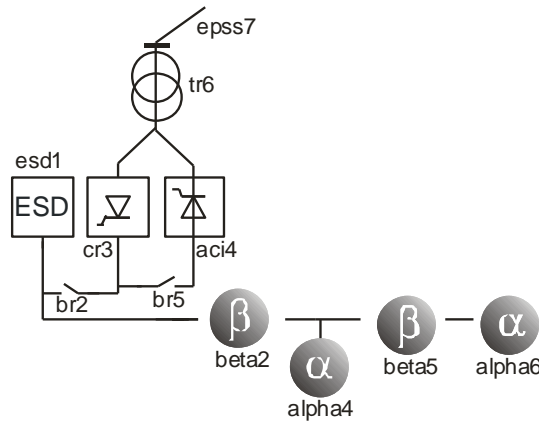


Рисунок 4.7 – Структурний подання сентенціальної форми  $l_8$

Наступна послідовність підстановок  $l_8 \Rightarrow l_9 \Rightarrow \dots \Rightarrow l_{23}$ , із застосуванням правил  $s_4, s_6, s_7, s_8, s_{11}, s_4, s_6, s_8, s_9, s_{10}, s_4, s_6, s_8, s_9, s_{11}$  дозволяє отримати  $l_{23} = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot ((c \cdot h) : (d \cdot x))) \cdot \beta \cdot ((a \cdot b \cdot c) \times \beta \cdot (\beta \cdot (c : (d \cdot x) \cdot b \cdot a)) \times (\beta \cdot c \cdot b \cdot a))$ . В результаті операцій часткового виведення повністю сформована структурна схема всіх тягових підстанцій зони споживання енергії рекуперації (рис. 5.8).

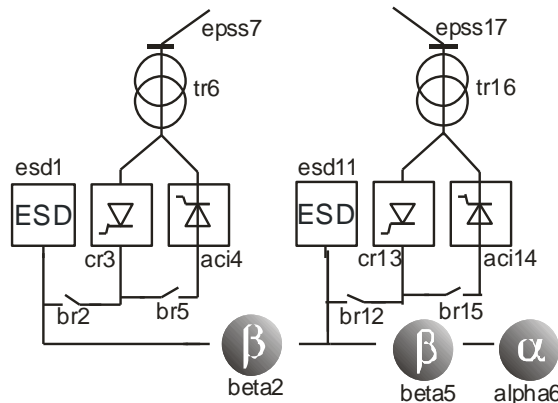


Рисунок 4.8 – . Структурне подання сентенціальної форми  $l_{23}$

Закінчується виведення підстановками  $l_{23} \Rightarrow l_{24} \Rightarrow \dots \Rightarrow l_{30}$ , із застосуванням правил  $s_{13}, s_{13}, s_{15}, s_{14}, s_{17}, s_{15}, s_{15}, s_{15}, s_{16}, s_{15}$  одержуючи при цьому  $l_{30} = ((e \cdot x) \times (a \cdot b) \cdot ((c \cdot h) : (d \cdot x))) \cdot (f : (f \cdot t \cdot f)) \cdot ((a \cdot b \cdot c) \times (f : f) \cdot (t \cdot f \cdot (c : (d \cdot x) \cdot b \cdot a)) \times (f \cdot c \cdot b \cdot a))$  і структурну схему на рис. 5.9.

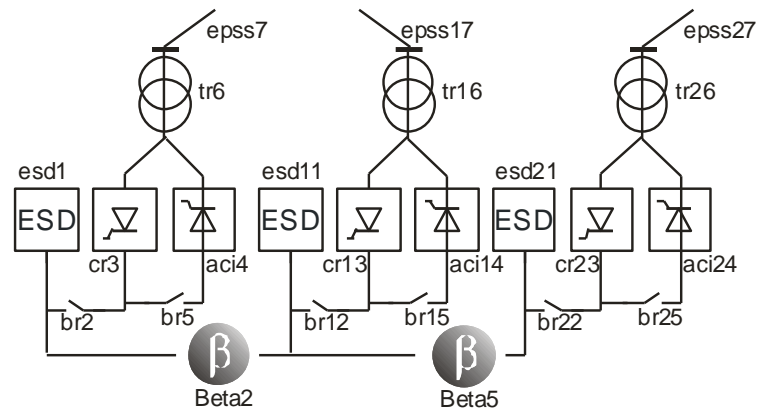


Рисунок 4.9 – Структурна схема зони споживання енергії рекуперації

(конструкція  $l_{30}$ )

Сформована структурна схема ділянки споживання енергії рекуперації моделює багатоваріантність структури задіяних тягових підстанцій і поїзної ситуації. Структура одноколійної ділянки для випадка використання всіх одиниць обладнання, задіяних у розподілі надлишкової енергії рекуперації представлена на рис. 4.10.

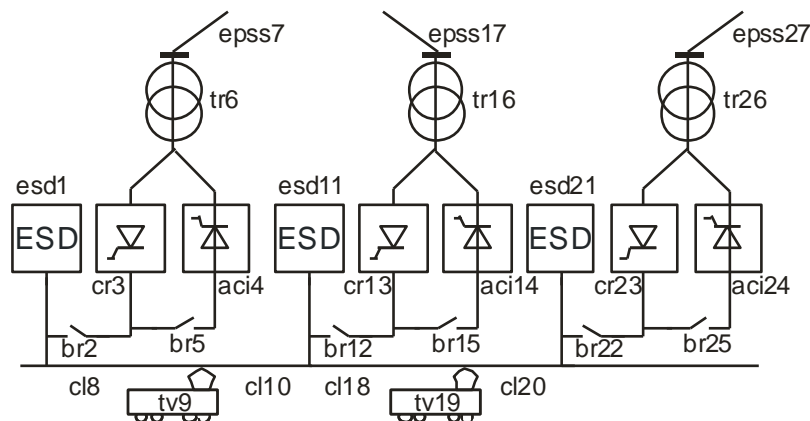


Рисунок 4.10 – Структура ділянки розподілу енергії рекуперації

Атрибутика елементів схеми формується пристроями вимірювання та передачі інформації і експертними висновками.

Розроблений метод моделювання заснований на можливостях КПС в новій предметній області. Термінальний алфавіт семантично наповнений образами електрообладнання, тягової мережі і споживачами електроенергії, обладнання – відповідною атрибутикою.

Наведений окремий випадок формування структурної схеми демонструє всі можливості КПС стосовно до даної задачі.

В рамках обраного напрямку досліджень необхідно розробити необхідні інструментальні програмні засоби для формування структурних схем зон споживання енергії рекуперації, отримання експертних рішень з управління та формування нейрофазі мереж прийняття рішень.

Запропонований новий підхід до вирішення задачі раціонального використання енергії рекуперації полягає в застосуванні методів і засобів штучних нейронних мереж, експертних систем і нечіткої логіки і математико-алгоритмічного конструктивізму.

Представлені методи конструктивно-продукційного моделювання структури зони розподілу енергії рекуперації в системі тяги постійного струму виконані на базі конкретизація КПС, яка дозволяє врахувати всі можливості і особливості сучасного обладнання систем тягового електропостачання, ділянок тягової мережі і поїзної ситуації.

#### **4.2. Нечітке управління режимами систем тягового електропостачання при розподіленні надлишкової енергії рекуперації**

Для реалізації ефективного розподілу енергії рекуперації в системах електричного транспорту, в тому числі і перспективних, що містять стаціонарні накопичувачі енергії і реверсивні ТП з плавним регулюванням вихідної напруги, необхідно вирішувати низку завдань з високим ступенем невизначеності, що вимагають врахування множини випадкових факторів, таких як режими живлячих мереж та тягових навантажень. Дані фактори повинні враховуватися при регулюванні режимів роботи накопичувачів, інверторів і регуляторів напруги на шинах ТП для забезпечення раціональних умови рекуперації енергії.

Розв'язок даної задачі вимагає побудови нечіткої моделі розподілу енергії рекуперації в системах тягового і зовнішнього електропостачання електротранспорту постійного струму, з урахуванням перспектив використання на ТП інверторів, накопичувачів і регуляторів вихідної напруги.



Це дозволить розв'язувати задачу керування режимами енергообміну накопичувачів, роботи інверторів і регуляторів вихідної напруги ТП на основі застосування фазі-логіки, що забезпечить раціональний розподіл енергії рекуперації за енергетичним критерієм.

#### 4.2.1. Формулювання задачі раціонального розподілу надлишкової енергії рекуперації

Для забезпечення раціональних умов рекуперації в системі електротранспорту зі стаціонарними керованими НЕ і інвертуючими ТП з плавним регулюванням вихідної напруги (рис. 4.11) необхідно враховувати режими системи зовнішнього електропостачання і тягового електроспоживання в зоні рекуперації, які безпосередньо визначають необхідні режими роботи НЕ, інверторів і регуляторів напруги ТП.

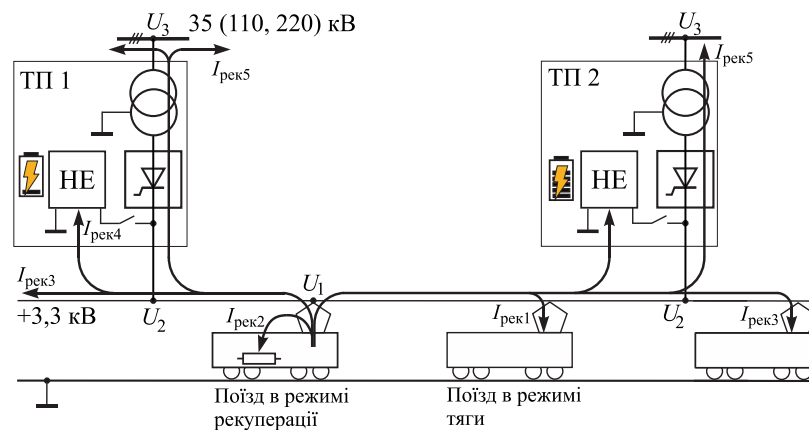


Рисунок 4.11 – Модель розподілу струму рекуперації транспортних засобів в системі тягового і зовнішнього електропостачання

На рис. 4.10 наведена схема декомпозиції струму рекуперації електротранспорту  $I_{рек}$ , де під надлишковим струмом розуміється та частина  $I_{рек}$ , яка не може бути безпосередньо спожита на тягу поїздів попутного (зустрічного) прямування, що перебувають у зоні рекуперації, тобто

$$I_{рек}^{надл} = I_{рек} - I_{рек1} = \sum_{k=2}^5 I_{рек k}, \quad (4.20)$$

де  $I_{\text{рек}1}$  – тягове навантаження в зоні рекуперації (частина струму  $I_{\text{рек}}$ , споживана поїздами попутного/зустрічного прямування);

$I_{\text{рек}2}$  – частина струму  $I_{\text{рек}}$ , що утилізується в гальмівних пристроях;

$I_{\text{рек}3}$  – частина струму  $I_{\text{рек}}$ , яка може бути передана на суміжні МПЗ до віддалених поїздів при регулюванні напруги на шинах транзитної ТП;

$I_{\text{рек}4}$  – частина струму  $I_{\text{рек}}$ , що споживається НЕ;

$I_{\text{рек}5}$  – частина струму  $I_{\text{рек}}$ , що споживається системою зовнішнього електропостачання (через інвертори ТП).

Мінімізація втрат енергії рекуперації  $\Delta W_{\text{рек}}$  в елементах систем тягового і зовнішнього електропостачання досягається при її розподілі між потенційними споживачами (поїзд, НЕ, живляча мережа) обернено пропорційно їх віддаленості від джерела з урахуванням їх ККД. Завдання раціонального розподілу надлишкової енергії рекуперації поїздів полягає у визначенні співвідношення між значеннями складових струму (4.20) в реальному часі, що забезпечить виконання цільової функції

$$\left( \begin{array}{l} I_{\text{рек}2}(t) \rightarrow \min, \\ \Delta W_{\text{рек}}(I_{\text{рек}3}(t), I_{\text{рек}4}(t), I_{\text{рек}5}(t)) \rightarrow \min \end{array} \right), \quad (4.21)$$

з урахуванням правої границі обмеження (1.8)

$$U_1(I_{\text{рек}3}(t), I_{\text{рек}4}(t), I_{\text{рек}5}(t)) \leq U_{1\text{max}} \quad (\text{рис. 4.10}).$$

Для точного врахування всіх факторів, що визначають раціональне розподіл енергії рекуперації поїзда, необхідно побудова складних математичних моделей і механізмів вимірювання параметрів, реалізація яких вимагає великих витрат. На практиці основою прийняття рішень можуть виступати знання, отримані від експертів [247, 248].

Враховуючи низький рівень інформаційного забезпечення систем тягового електропостачання, для прийняття оперативних рішень за виразом (4.21) можуть бути використані принципи нечіткого управління. Нечіткі закони регулю-

вання режимів тягового електропостачання забезпечують підтримання напруги на струмоприймачах рекуперативних поїздів в допустимих межах за умови дефіциту тягового електроспоживання в зоні рекуперації. Це реалізується шляхом прийняття рішень щодо рівню енергії рекуперації споживаної накопичувачами (в залежності від ступеня їх заряду), живлячою енергосистемою (в залежності від її завантаження), та можливого забезпечення її перетікань на суміжні МПЗ до віддалених поїздів (в залежності від їх положення на ділянці). При цьому можливе узгодження роботи накопичувачів енергії в режимах вирівнювання пікових тягових навантажень та локальної буферизації надлишкової енергії рекуперації.

При співвідношенні струмів рекуперації і тяги в зоні рекуперації

$$I_{\text{тяг}}(t)/I_{\text{рек}}(t) \geq 1, \quad (4.22)$$

надлишковий струм  $I_{\text{рек}}^{\text{надл}} = 0$  і система не потребує управління. В іншому випадку необхідно управління режимами роботи силового обладнання для оптимізації розподілу струму  $I_{\text{рек}}^{\text{надл}}$  за критерієм (4.21).

#### 4.2.2. Описання нечіткої моделі управління розподілом надлишкової енергії рекуперації

Пріоритетність передачі надлишкової енергії рекуперації до НЕ, зовнішньої мережі або поїздів на віддалених ділянках (відповідно струмами  $I_{\text{рек3}}$ ,  $I_{\text{рек4}}$  або  $I_{\text{рек5}}$ ) визначається в залежності від положення рекуперативного поїзда на ділянці відносно потенційних приймачів енергії та їх стану. Нечітке керування режимами роботи накопичувачів, інверторів і регуляторів вихідної напруги ТП в області допустимих значень повинно враховувати умови (4.21) і обмеження напруги в тяговій мережі згідно [15, 16] у випадках, коли  $U_1 \rightarrow U_{1\text{max}}$ .

Вхідними даними нечіткої моделі розподілу енергії є набір змінних (згідно рис. 4.10)

$$X = \langle E(t), I_1(t), U_1(t), U_2(t), U_3(t) \rangle, \quad (4.23)$$

де –  $E(t)$  поточний рівень заряду накопичувача;  $I_1(t)$  – тягове електроспоживання в зоні рекуперації;  $U_1(t)$  – напруга на струмоприймачі рекуперируючого поїзда;  $U_2(t)$  – напруга на виході ТП;  $U_3(t)$  – напруга зовнішньої мережі (на вході ТП).

Параметрами управління нечіткого регулятора є змінні

$$Y = \langle I_{\text{рек2}}(t), I_{\text{рек3}}(t), I_{\text{рек4}}(t), I_{\text{рек5}}(t) \rangle, \quad (4.24)$$

представляють собою компоненти надлишкового струму рекуперації, які повинні бути визначені згідно умови (4.21).

Вхідні і вихідні змінні мають свої області визначення, які розбиті на три або чотири нечітких діапазони (терми), наведених в табл. 4.2 і табл. 4.3, де low – низький рівень величини, medium low – середньонизький, середній – середній, medium high – середньовисокий, high – високий рівень.

Таблиця 4.2 – Вхідні дані та їх діапазони

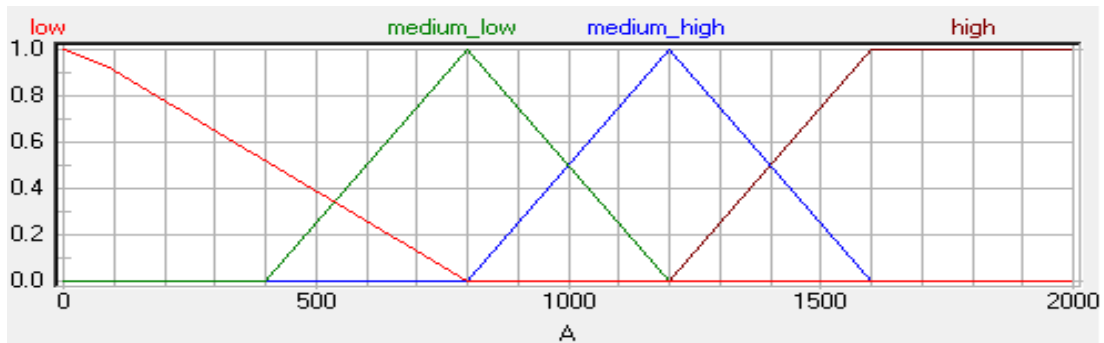
№	Ім'я змінної	Діапазон	Терми
1	$E(t)$	0...100 %	Low, medium, high
2	$I_1(t)$	0...2 кА	Low, medium low, medium high, high
3	$U_1(t)$	2,2...4 кВ	Low, medium low, medium high, high
4	$U_2(t)$	2,7...4 кВ	Low, medium, high
5	$U_3(t)$	33...37 кВ	Low, medium, high

Таблиця 4.3 – Параметри управління та їх діапазони

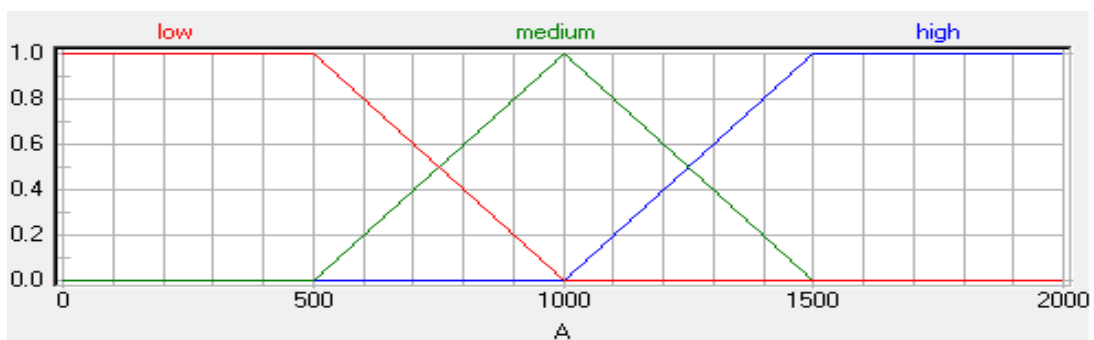
№	Ім'я змінної	Діапазон	Терми
1	$I_{\text{рек2}}(t)$	0...2 кА	Low, medium, high
2	$I_{\text{рек3}}(t)$	0...2 кА	Low, medium, high
3	$I_{\text{рек4}}(t)$	0...2 кА	Low, medium, high
4	$I_{\text{рек5}}(t)$	0...2 кА	Low, medium, high

Вхідні і вихідні змінні задаються нечіткими термами з трикутними функціями приналежності [118, 132, 133]. Наприклад, на рис. 4.12 наведені функції прина-

лежності для вхідної змінної  $I_1(t)$  і вихідної  $I_{рек4}(t)$ . Лінійна форма функцій приналежності та її параметри обрані на основі експертної думки, однак може бути обґрунтована і інша форма (наприклад, експоненціальна) на основі порівняння розв'язку даної задачі детермінованим і нечітким методами. Близькість отриманих результатів буде відповідати більш адекватної функції приналежності.



a)



б)

Рисунок 4.12 – Функції приналежності вхідного параметра – тягового навантаження в зоні рекуперації  $I_{рек1}$  (a) і вихідного параметра – складової струму рекуперації  $I_{рек2}$ , що утилізується в гальмівних реостатах (б)

Наведені функції приналежності можуть бути виражені у вигляді табл. 4.4 і табл. 4.5.

Таблиця 4.4 – Функція приналежності тягового навантаження в зоні рекуперації

Название терма	Функція	Значення (x, y)		
		low	linear	(0, 1)
		(2000, 0)		
medium low	linear	(0, 0)	(400, 0)	(800, 1)
		(1200, 0)	(2000, 0)	
medium high	linear	(0, 0)	(800, 0)	(1200, 1)
		(1600, 0)	(2000, 0)	
high	linear	(0, 0)	(1200, 0)	(1600, 1)
		(2000, 1)		

Таблиця 4.5 – Функція приналежності складової струму рекуперації, що утилізується в гальмівних пристроях

Название терма	Функція	Значення (x, y)		
		low	linear	(0, 1)
		(2000, 0)		
medium	linear	(0, 0)	(500, 0)	(1000, 1)
		(1500, 0)	(2000, 0)	
high	linear	(0, 0)	(1000, 0)	(1500, 1)
		(2000, 1)		

Модель раціонального розподілу надлишкової енергії рекуперації в межах однієї ТП побудована на базі п'яти блоків правил та має структуру, що наведена на рис. 4.13. Кожен блок правил використовує метод Мамдані для нечіткого виводу [227-234]. 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 висновок тільки в тому випадку, якщо ще не було прийнято рішення.

Модель розподілу енергії рекуперації в межах декількох ТП значно ускладнюється в частині збільшення зав'язків і блоків логічних операцій і для випадку розподілу в межах двох ТП представлена на рис. 4.14.

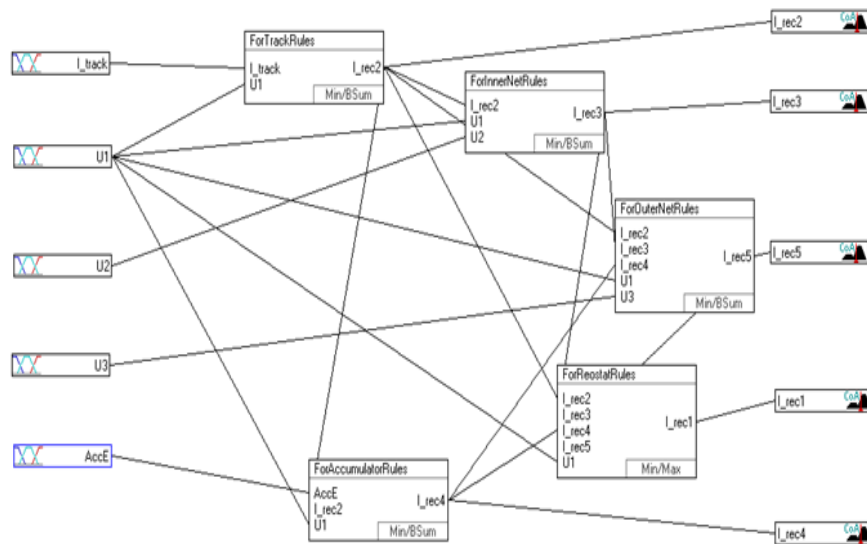


Рисунок 4.13 – Нечітка модель розподілу енергії рекуперації в межах однієї ТП

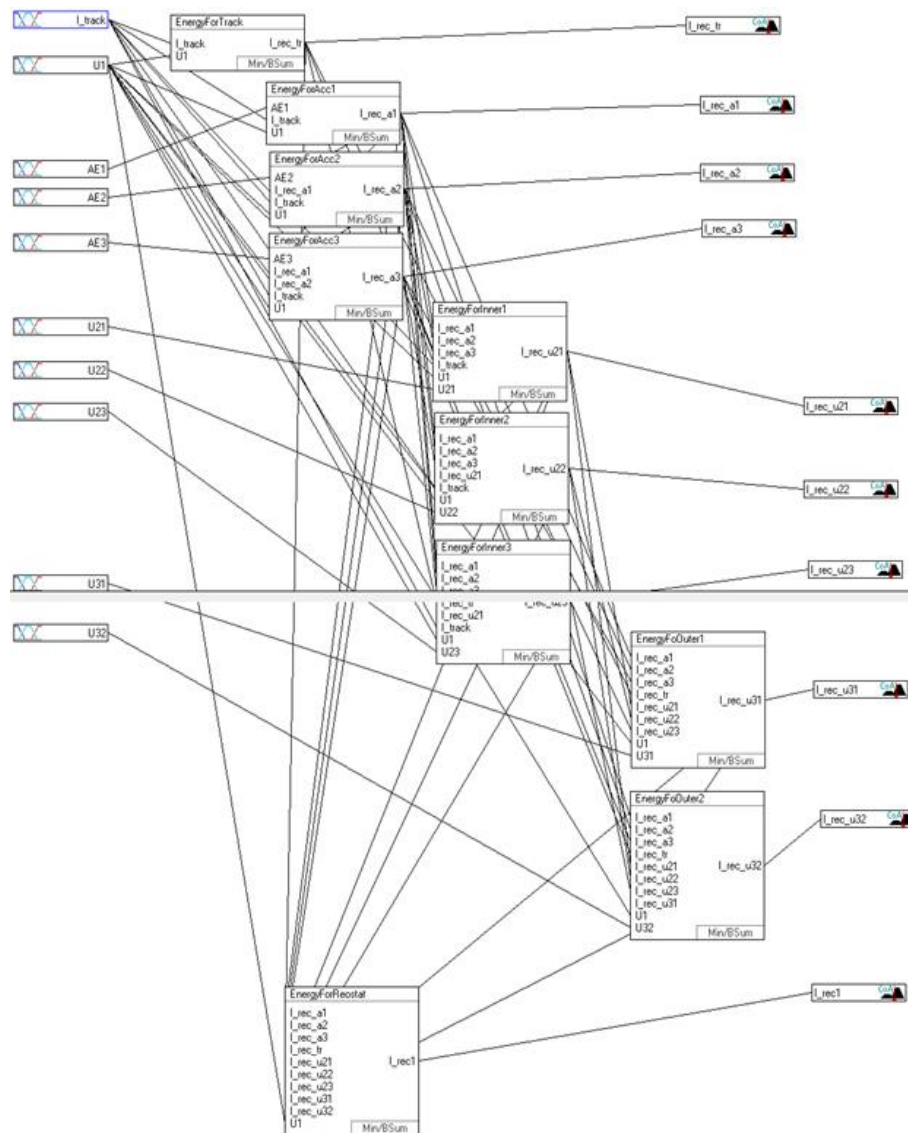


Рисунок 4.14 – Нечітка модель розподілу енергії рекуперації в межах двох ТП

Якщо на ділянці рекуперації має місце дефіцит або відсутність тягового електроживлення ( $U_1 \rightarrow U_{1\max}$ , рис. 4.10), для забезпечення необхідних умов рекуперації необхідно провести ряд комутацій силового обладнання ТП. Правила прийняття рішень про розподіл струму, що створені експертом, являють собою послідовність команд з управління силовим обладнанням ТП.

**Правило 1.** Включити НЕ в режим заряду:

$$\begin{cases} I_{\text{рек4}} \rightarrow I_{\text{рек}}, (I_{\text{рек3}} + I_{\text{рек5}}) \rightarrow \min, \text{ при } E(t) = 0 \%, \\ I_{\text{рек4}} \rightarrow \text{opt}, (I_{\text{рек3}} + I_{\text{рек5}}) \rightarrow \text{opt}, \text{ при } E(t) < 100\%, \\ I_{\text{рек4}} = 0, (I_{\text{рек3}} + I_{\text{рек5}}) \rightarrow I_{\text{рек}}, \text{ при } E(t) = 100\%. \end{cases} \quad (4.25)$$

**Правило 2.** Знизити напругу  $U_2(t)$  на вихідних шинах ТП в діапазоні  $U_2(t) \geq U_{2\min}$  що забезпечить  $U_1(t) < U_{1\max}$ :

$$\begin{cases} I_{\text{рек3}} \rightarrow I_{\text{рек}}, I_{\text{рек5}} \rightarrow \min, \text{ якщо } U_1(t) < U_{1\max} \text{ при } U_2(t) \geq U_{2\min}, \\ I_{\text{рек3}} \rightarrow 0, I_{\text{рек5}} \rightarrow I_{\text{рек}}, \text{ якщо } U_1(t) = U_{1\max} \text{ при } U_2(t) = U_{2\min}. \end{cases} \quad (4.26)$$

**Правило 3.** Перевести ТП в режим інвертування (якщо напруга живлячої мережі  $U_3(t) < U_{3\max}$ ):

$$\begin{cases} I_{\text{рек5}} \rightarrow I_{\text{рек}}, \text{ якщо } U_3(t) < U_{3\max}, \\ I_{\text{рек5}} \rightarrow 0, I_{\text{рек}} = I_{\text{рек2}}, \text{ якщо } U_3(t) \geq U_{3\max}. \end{cases} \quad (4.27)$$

**Правило 4.** Включити реостатне або механічне гальмування (при  $E(t) = 100\%$ ,  $U_2 = U_{2\min}$ ,  $U_3(t) = U_{3\max}$ ).

Останнє правило являє собою часткову утилізацію надлишкової енергії рекуперації струмом  $I_{\text{рек2}}(t)$  і є самим небажаним варіантом, тому застосовується при вичерпанні можливостей розподілу енергії струмами  $I_{\text{рек3}}(t)$ ,  $I_{\text{рек4}}(t)$ ,  $I_{\text{рек5}}(t)$  за виразами (4.25)-(4.27).

Наведені евристичні правила структуровані за допомогою моделі рис. 4.12 в середовищі «FuzzyTech» [248] у вигляді блоків, наведених в табл. 4.6.



Таблиця 4.6 – Структура блоків нечіткої моделі

№	Ім'я блоку	Опис	Входи	$n^*$
1	ForTrackRules	Визначення кількості енергії, що передається на тягу	$U_1, I_1$	16
2	ForAccumulatorRules	Визначення частки енергії, для передачі в накопичувач	$U_1, E, I_{рек2}$	32
3	ForInnerNetRules	Визначення частки енергії, для передачі в ТП	$U_1, U_2, I_{рек2}$	12
4	ForOuterNetRules	Визначення частини енергії для передачі в систему зовнішнього електропостачання	$U_1, U_3, I_{рек2}, I_{рек3}, I_{рек4}$	120
5	ForReostatRules	Визначення кількості енергії, що потребує утилізації в гальмівних реостатах	$U_1, I_{рек2}, I_{рек3}, I_{рек5}$	63
$n^*$ – кількість правил				

Блоки містять правила, що задані у вигляді таблиць. Наприклад, блок правил «ForAccumulatorRules» – визначення енергії, що передається в накопичувач. Кожен блок містить велику кількість рядків, що описує множину станів входів і виходів. Показник DoS [132] позначає ступінь надійності кожного правила (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Показники ступеня надійності правил

IF			THEN	
$E$	$I_{рек2}$	$U_1$	DoS	$I_{рек4}$
low	low	low	1.00	high
low	low	medium low	1.00	high
low	low	medium high	1.00	high
low	low	high	1.00	high
low	medium	low	1.00	medium
....	....	....	....	....
high	high	high	1.00	low

### 4.2.3. Реалізація нечіткого управління розподілом надлишкової енергії рекуперації

Для прийняття рішення про кількість енергії рекуперації, що передається, наприклад, накопичувач для тимчасового зберігання, входними параметрами є

змінні  $U_1(t)$  і  $E(t)$ , а виходом  $I_{\text{рек4}}(t)$ . Знання експерта являють собою співвідношення виду:

$$R = (U_1, E) \rightarrow I_{\text{рек4}}, \quad (4.28)$$

де  $(U_1, E)$  – посилення;  $I_{\text{рек4}}$  – наслідок;  $\rightarrow$  – операція нечіткої імплікації.

Для кожного параметра відомі функції приналежності нечітких термів, відповідно  $\mu_{U_1 i}(x)$ ,  $\mu_{E i}(x)$  і  $\mu_{I_{\text{рек4}} i}(x)$ . Ступінь приналежності конкретних вхідних значень  $(U_1, E)$  до кожного правила з експертної бази визначається виразом:

$$\mu_{I_{\text{рек4}} j}(I_{\text{рек4}}) = \mu_{E j}(U_1) \wedge \mu_{I_{\text{рек4}} j}(E), \quad (4.29)$$

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

В результаті отримуємо наступну нечітку множину

$$I_{\text{рек4}} = \vee_{j=1..n} \mu_{I_{\text{рек4}} j}(I_{\text{рек4}} j), \quad (4.30)$$

де  $\vee$  – операція логічного максимуму.

Точне (чітке) значення параметрів змінної  $I_{\text{рек4}}$  визначається як середньозважена сума

$$I_{\text{рек4}} = \frac{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{\text{рек4}} j}(I_{\text{рек4}} j) I_{\text{рек4}} j}{\sum_{j=1..n} \mu_{I_{\text{рек4}} j}(I_{\text{рек4}} j)}. \quad (4.31)$$

Для визначення чітких значень вихідних величин у роботі був використаний метод дефазифікації «Center of Area» (центр площі). У результаті перебору множини варіантів різних вхідних станів моделі (рис. 4.12) згідно (4.25)-(4.27) отримано простори прийняття рішень щодо розподілу енергії рекуперації електротранспорту по всім можливим каналам, геометричною інтерпретацією яких у певних умовах є поверхні, наведені на рис. 4.15 [257-261].

Дані залежності відображають необхідні алгоритми управління силовим обладнанням ТП в реальному часі в залежності від поточного стану тягової і

живлячої енергосистем (а саме рівня тягового навантаження в зоні рекуперації, заряду накопичувачів, напруги на вводах ТП).

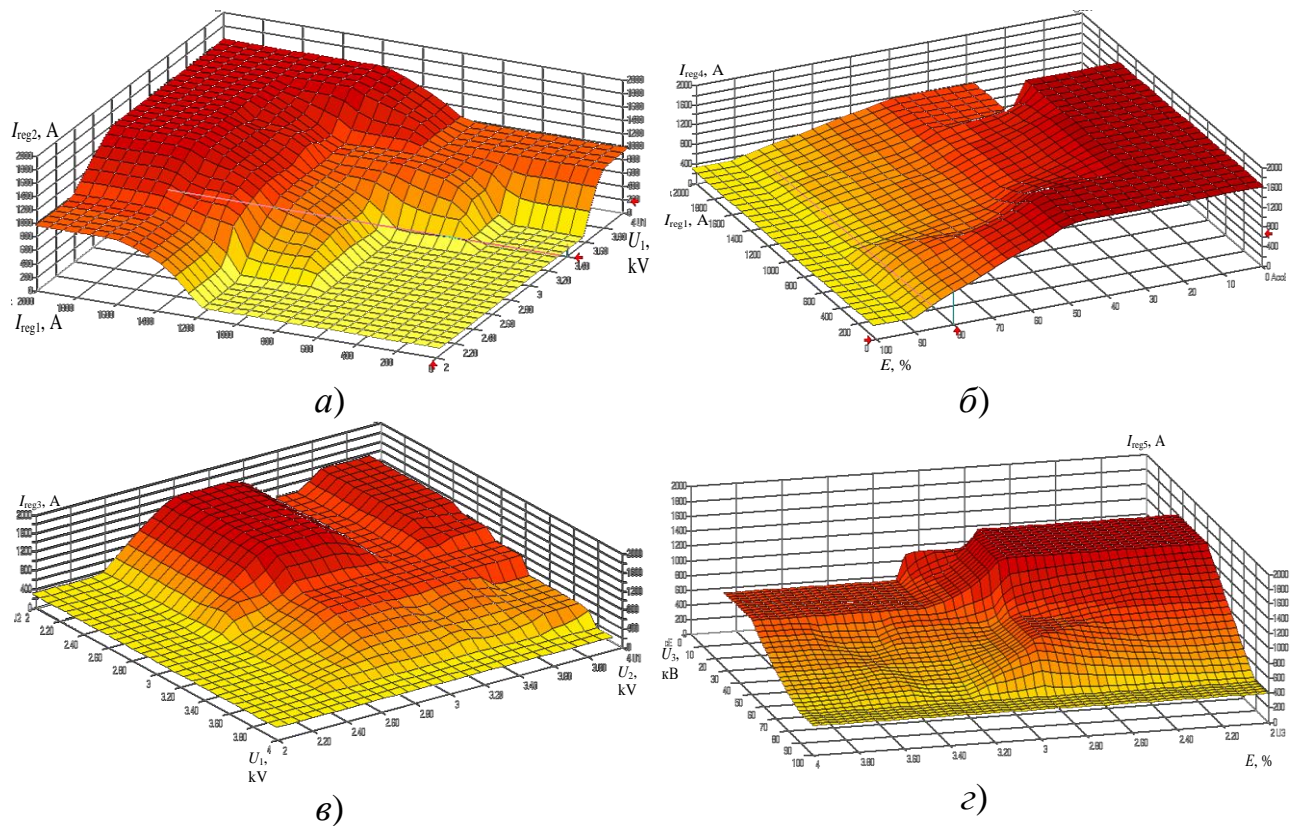


Рисунок 4.15 – Область прийняття рішень для залежностей  $I_{рек2} = f(I_{рек1}, U_1)$

(а),  $I_{рек4} = f(I_{рек1}, E)$  (б),  $I_{рек3} = f(U_1, U_2)$  (в),  $I_{рек5} = f(E, U_3)$  (г)

На рис. 4.16 представлені приклади виведення програми «FuzzyTech» для конкретного випадку прийняття рішення системою про розподіл надлишкової рекуперації енергії в системах тягового і зовнішнього електропостачання електротранспорту.

Inputs:		Outputs:		Inputs:		Outputs:	
AccE	80.0000	I_rec1	1439.7500	AccE	19.0000	I_rec1	(0.0000)
I_track	0.0000	I_rec2	187.6500	I_track	900.0000	I_rec2	1000.0000
U1	3.3000	I_rec3	741.3000	U1	3.5000	I_rec3	(0.0000)
U2	3.4000	I_rec4	777.9000	U2	2.0000	I_rec4	1659.9500
U3	4.0000	I_rec5	633.3500	U3	2.0000	I_rec5	(0.0000)

Рисунок 4.16 – Приклади вихідних даних, отриманих в результаті моделювання

Система нечіткого управління дозволить оперативно приймати рішення про раціональний розподіл надлишкової енергії рекуперації ґрунтуючись на неповних даних отриманих системами вимірювань. Дані рішення є основою інтелектуального регулювання режимів тягового електропостачання при рекуперації енергії транспортних засобів.

Розроблена система управління накопичувачами енергії, інверторами та регуляторами вихідної напруги тягових підстанцій на базі нечіткої логіки може забезпечувати необхідні умови рекуперації електротранспорту на ділянках при дефіциті тягового електроспоживання та дозволяє оптимізувати розподіл надлишкової енергії гальмування транспортних засобів. Це досягається шляхом визначення раціонального співвідношення між складовими надлишкового струму рекуперації в реальному часі, що може забезпечити мінімум втрат рекупераційної енергії в системах тягового і зовнішнього електропостачання.

Використання розробленого підходу є ефективним в умовах неповної інформації, одержуваної системами виміру і на базі додаткових досліджень може дозволити мінімізувати встановленню потужність накопичувачів, інверторів і регуляторів вихідної напруги тягових підстанцій, що зменшить капітальні витрати на модернізацію існуючих і електрифікацію нових ділянок систем електротранспорту.

#### **4.3. Принцип інтелектуального управління розподілом струму рекуперації транспортних засобів в системі тягового електропостачання**

Інтелектуальні системи управління, що використовують апарат штучних нейронних мереж і нечітку логіку, дозволяють проводити ідентифікацію складних нелінійних динамічних об'єктів і синтезувати для них нелінійні закони управління, що дає можливість вирішувати завдання синтезу управління в умовах невизначеності на основі наявних експериментальних даних, отриманих на об'єкті.

Найважливішим достоїнством апарату нейронних мереж є можливість їх навчання та адаптації. Не потрібно знання математичної моделі про об'єкт. На основі вхідних і заданих еталонних сигналів нейронна мережа може навчитися керувати об'єктом. Нейронні мережі складаються з величезної кількості взаємопов'язаних простих елементів, які називаються нейронами. На жаль спосіб проектування подібних систем ґрунтується радше на інтуїції, ніж на існуючих закономірностях. До теперішнього часу не існує способу розрахувати кількість шарів і нейронів у структурі мережі для конкретного застосування. Проте, після закінчення навчання нейронні мережі стали незамінним механізмом у вирішенні завдань розпізнавання образів, апроксимації, оптимізації, задачах класифікації та управління.

Застосування нейронних мереж в задачах управління має суттєвий недолік: інформацію про об'єкт управління нейронна мережа отримує в процесі навчання, а для цього необхідний великий обсяг експериментальних даних. Уникнути цього недоліку можливо шляхом застосування структур нечіткої логіки, що дозволяє забезпечити формалізацію якісних, розмитих в смисловому плані, понять і зв'язків. На основі методів нечіткої логіки вдається проектувати системи управління [253-257], здатні ефективно функціонувати в умовах наявності інформації про об'єкт управління лише якісний характер. Об'єднання обох підходів дозволяє привнести здатність до навчання в системи нечіткого управління і додати до формалізму нейронної мережі інтелектуальну складову, засновану на складених експертом правилах.

Систему нечіткого управління можна представити у вигляді багатошарової нейронної мережі з прямим розповсюдженням сигналу. Для їх навчання, до теперішнього часу успішно використовується алгоритм зворотного поширення помилки [233, 250-254].

У підрозділі 4.2.3 представлено опис нечіткої моделі на базі правил посилка-наслідок (4.30), для організації виведення використана операція логічного мінімуму (4.32), метод дефазифікації центр площі (4.24).

Для реалізації механізму навчання нейро-нечіткої системи необхідно представити функції приналежності в вигляді функції Гауса:

$$\mu(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x - x^k}{\sigma^k} \right)^2 \right], \quad (4.32)$$

де  $x^k$  и  $\sigma^k$  мають фізичні відображення,  $\sigma^k$  – ширина гаусової кривої, а  $x^k$  – її центр. Ці параметри будуть змінені у процесі навчання, тим самим зміняться позиції і структура нечітких множин.

Багатошарова нейронна мережа, призначена для навчання нечіткої системи управління, буде мати чотири шари (рис. 4.15). Шари позначимо як L1...L4, символом  $\Pi$  позначимо мультиплікатор, який перемножує всі вхідні сигнали, символ  $\Sigma$  - суматор, призначений для підсумовування сигналів. Точками, розміщеними на вузлах позначені ваги зв'язків.

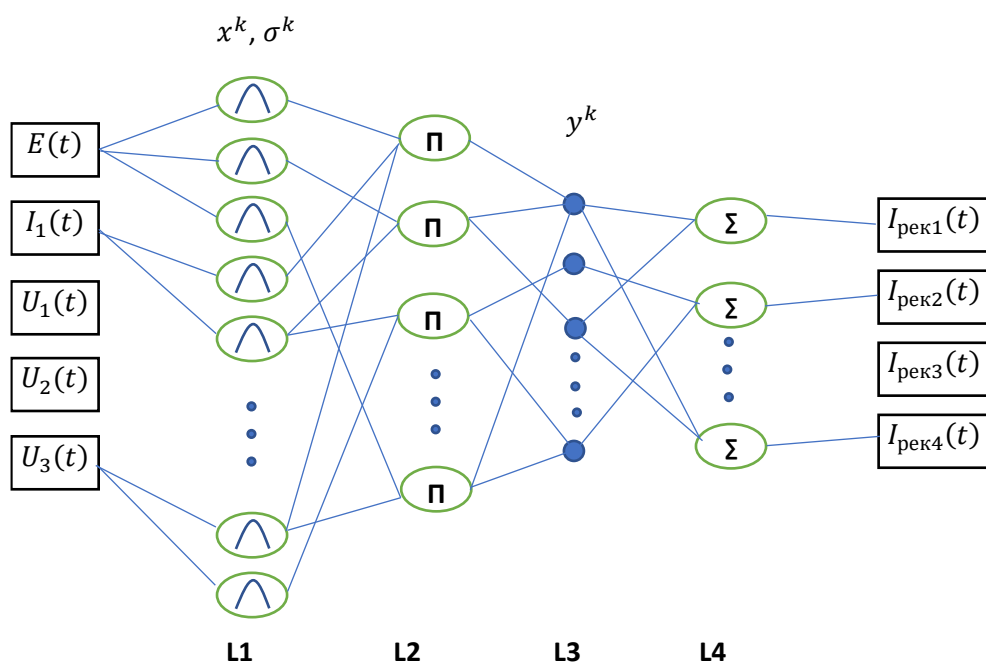


Рисунок 4.17 – Нейронна мережа, заснована на нечіткому виводі про розподіл надлишкової енергії рекуперації

Елементи слою L1 реалізують функцію приналежності в формі функції Гауса, з параметрами  $x^k$  та  $\sigma^k$ . До цього слою надходять вхідні сигнали  $\langle E(t), I_1(t), U_1(t), U_2(t), U_3(t) \rangle$ , на ньому формуються значення функції

приналежності для цих сигналів. Параметри  $x^k$  и  $\sigma^k$ , інтерпретуються як центр і ширина кожної функції, вони будуть модифікуватися в процесі навчання, що дозволить поліпшити підбір нечітких множин. Кількість елементів шару L1 дорівнює кількості всіх множин з різними видами функцій приналежності. В разі N нечітких правил і п'яти вхідних змінних, з чотирма нечіткими термами отримуємо  $5 \cdot 4 \cdot N$  вузлів шару.

Шар L2 це мультиплікатори, відповідають блоку правил нечіткої системи. На виході шару формується результат у вигляді функції приналежності  $\mu(y)$  відповідний значенню кожного правила. Кількість елементів шару відповідає кількості правил N. Вузол мережі відповідає правилу, пов'язаному з відповідними посилками з шару L1. Операція мультиплікатора відповідає логічному мінімуму, що застосовується для нечіткого висновку.

Шар L3 і L4 представляють реалізацію блоку дефазифікації, ваги зв'язків  $y^k$  інтерпретуються як центри функцій приналежності нечітких множин виходів з кожного правила. Ці ваги будуть модифікуватися в процесі навчання, як і величини  $x^k$  и  $\sigma^k$ , у L1. На виході шару L4 формується чітке значення виходів системи управління. Така структура являє собою нейронну мережу, засновану на ідеї нечіткого виводу. На відміну від класичних нейронних мереж, кожен елемент має інтерпретацію, засновану на інформації отриманої з експертних даних, в процесі складання нечіткої моделі.

Завдання алгоритму зворотного поширення помилки [118] полягає в корекції параметрів модуля нечіткого управління  $x^k$ ,  $\sigma^k$  и  $y^k$ , так щоби міра похибки  $\varepsilon$  була мінімальною:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [y - d]^2, \quad (4.33)$$

де  $y$  значення одного вихідного сигналу, а  $d$  – еталоне значення того ж самого сигналу з контрольних даних.

Алгоритм зворотного поширення помилки відноситься до градієнтних методів. Їх ідея полягає в зменшенні попереднього значення ваги на величину похідної від міри похибки, помножену на деякий коефіцієнт. Процес повинен

тривати так довго, щоб похибка на виході системи досягла апріорно встановленої мінімальної величини. Для ваги  $y^k$  вираз, який визначає спосіб модифікації має вигляд:

$$y^k(t+1) = y^k(t) - \eta \frac{\partial e(t)}{\partial y^k(t)}. \quad (4.34)$$

Тут  $t = 0, 1, 2 \dots$  є номер ітерації, а константа  $\eta \in (0, 1)$  коефіцієнт, що визначає швидкість навчання або крок корекції.

Відповідно для параметрів  $x^k, \sigma^k$  буде:

$$x^k(t+1) = x^k(t) - \eta \frac{\partial e(t)}{\partial x^k(t)}, \quad (4.35)$$

$$\sigma^k(t+1) = x\sigma^k(t) - \eta \frac{\partial e(t)}{\partial \sigma^k(t)}. \quad (4.36)$$

Представлені залежності визначають спосіб модифікації ваг. На першому етапі вхідний вектор  $\langle E, I_1, U_1, U_2, U_3 \rangle$  поширюється в мережі в прямому напрямку, і послідовно розраховуються всі значення виходів  $\langle I_{рек1}, I_{рек2}, I_{рек3}, I_{рек4} \rangle$ . На другому етапі розраховуються нові значення ваги  $y^k(t+1), x^k(t+1)$  и  $\sigma^k(t+1)$ , після чого старі значення замінюються новими, і лічильник кількості ітерацій  $t$  збільшується на 1. Це повторюється для всіх вхідних сигналів з навчальних даних.

Розглянемо приклад вихідних функцій приналежності для вхідного параметра  $U_1(t)$ , задані у вигляді функцій Гауса (рис. 4.16). Після роботи алгоритму зворотного поширення помилки, параметри функцій будуть змінені для відповідності навчальній вибірці [262, 263].

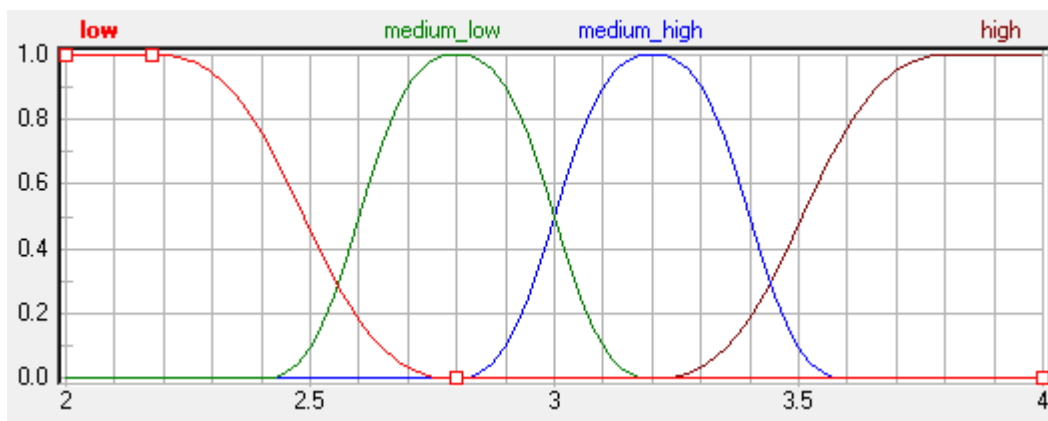


Рисунок 4.18 – Вихідна функція приналежності вхідного параметра  $U_1(t)$



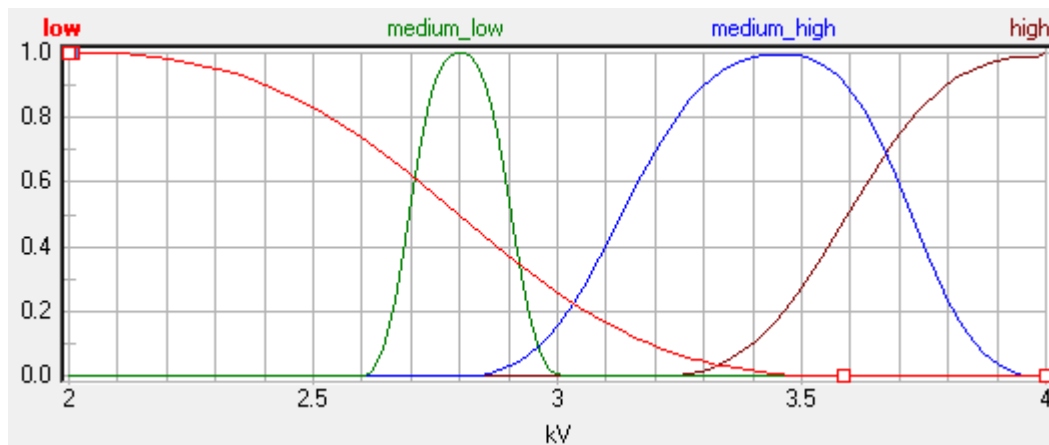


Рисунок 4.19 – Вихідна функція приналежності параметра  $U_1(t)$ , змінена для відповідності навчальній вибірці

Таким чином, представлена структура моделі нечіткого управління, яка набуває можливості навчатися, на відміну від класичних систем нечіткого управління, що використовують тільки знання експерта. Застосування нейро-нечітких систем управління дозволяє підвищити якість одержуваного управління, завдяки навчанню на експериментальних даних.

#### Висновки до розділу 4

1. Розроблено принципи конструктивно-продукційного моделювання зони розподілу енергії рекуперації в системі тяги постійного струму, в результаті чого в роботі створено алгоритм генерації багатоваріантної структури СТЕ та отримано множину моделей обладнання СТЕ в зоні рекуперації для розробки узагальненого алгоритму раціонального управління обладнанням і розподілу енергії.

2. 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 електропо-

стачання. 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.

3. Розроблена структура нейронної мережі, яка набуває можливості навчатися, на відміну від класичних систем нечіткого управління, що використовують тільки знання експерта. Застосування нейро-нечітких систем управління дозволяє підвищити якість одержуваного управління на основі використання бази знань, отриманої завдяки навчанню на експериментальних даних.

**Матеріали розділу опубліковано в [255-263].**

## РОЗДІЛ 5

### РОЗВИТОК МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ПРИ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ

#### 5.1. Визначення теоретичного потенціалу енергозбереження при рекуперації енергії

Вдосконалення систем електропостачання електрифікованого транспорту з метою підвищення ефективності використання енергії рекуперації, а саме впровадження накопичувачів енергії (НЕ) на тягових підстанціях (ТП), інверторних агрегатів (ІА) та регуляторів напруги (РН) на шинах ТП потребує розвитку підходів щодо визначення технічного та економічно доцільного потенціалу енергозбереження при рекуперації для існуючих і перспективних систем транспорту. Це дозволить обирати науково обґрунтовані технології та енергозберігаюче обладнання з мінімальними вартісними показниками та надлишковою потужністю в залежності від експлуатаційних показників ділянок.

В якості кількісного показника ефективності рекуперації енергії може розглядатися величина коефіцієнта рекуперації [6] за час електроспоживання (рекуперації)  $T$ , що є відношенням генерованої енергії при електричному гальмуванні  $W_{\text{рек}}$  до витрати енергії на тягу  $W_{\text{тяг}}$  (з урахуванням витрат на власні потреби поїзда) на конкретній ділянці, в режимі руху тощо, який може бути визначений як

$$k_{\text{рек}} = \frac{W_{\text{рек}}}{W_{\text{тяг}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{t_{\text{ни}}}^{t_{\text{ки}}} U_c(t) I_{\text{рек}}(t) dt}{\int_0^T U_c(t) I_{\text{тяг}}(t) dt} \quad (5.1)$$

де  $U_c(t)$  – напруга на струмоприймачі транспортного засобу;

$I_{\text{рек}}(t)$ ,  $I_{\text{тяг}}(t)$  – відповідно струм в режимі рекуперації і тяги;

$t_{pi}, t_{ki}$  – відповідно моменти початку та закінчення рекуперативного гальмування;

$n$  – кількість актів рекуперативного гальмування.

Теоретичний потенціал енергозбереження від застосування рекуперації в системі електричної тяги може бути визначений шляхом виконання тягових розрахунків з розв'язанням гальмівної задачі, де при відомих параметрах ділянок, режимах руху, швидкості початку гальмування і маси поїздів за виразом (1.3) визначається максимальна енергія рекуперації  $W_{рек}$ , яка буде різною для різних ділянок і експлуатаційних факторів (розмірів руху на ділянках, тощо). Таким чином величина (1.3) є в абсолютних одиницях теоретичним потенціалом енергозбереження при використанні рекуперації енергії

$$\Pi^{теор} = W_{рек}. \quad (5.2)$$

У відносних одиницях це буде теоретичний коефіцієнт рекуперації  $k_{рек}^{теор}$ .

Величина  $k_{рек}^{теор}$  залежно від експлуатаційних показників для ділянок зі шкідливими спусками може бути виражена як

$$k_{рек}^{теор} = \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} \frac{i - (w_0 + w_{кр})}{i + w_0 + w_{кр}} \eta_{сер} \eta_{рек} \gamma_{рек}, \quad (5.3)$$

де  $\Gamma_1, \Gamma_2$  – річні вантажопотоки відповідно в бік підйому і спуску, млн т/рік;

$\gamma_{рек}$  – частка гальмівної сили рекуперації в загальній гальмівній силі поїзда при додатковому пригальмовуванні механічними гальмами.

Для середньо-експлуатаційних умов маємо  $w_0 + w_{кр} \approx 4$  Н/кН,  $\eta_{сер} \approx 0,88$ ,  $\eta_{рек} \approx 0,87$  [9], тоді вираз (5.3) прийме вигляд

$$k_{рек}^{теор} = 0,65 \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} \frac{i - 4}{i + 4} \gamma_{рек}. \quad (5.4)$$

В умовах експлуатації рекуперація на гірських ділянках дозволяє скоротити витрату електроенергії на 10...20 % ( $k_{\text{рек}}^{\text{теор}} \approx 0,1...0,2$ ), що особливо відчутно, якщо спуск розташований у вантажонапруженому напрямку (при  $\Gamma_2 > \Gamma_1$ ).

Енергетичну ефективність рекуперації у циклічних видах руху на ділянках з легким і середнім профілем, де гальмування використовується переважно для зупинок доцільно охарактеризувати величиною  $k_{\text{рек}}$ , що визначається у вигляді відношення кількості енергії, що повертається при рекуперації до втрат енергії в гальмах при відсутності рекуперації

$$k_{\text{рек}}^{\text{теор}} = \left( 1 - \frac{v_{\text{к}}^2}{v_{\text{п}}^2} \right) \eta_{\text{сер}} \eta_{\text{рек}}.$$

Для ЕРС з колекторним електроприводом і релейно-контакторною системою управління можна вважати  $v_{\text{к}} = (0,4...0,6)v_{\text{п}}$  [9],  $\eta_{\text{сер}} \eta_{\text{рек}} = 0,65$ , тоді отримаємо

$$k_{\text{рек}}^{\text{теор}} = 0,2...0,25.$$

Оскільки втрати в гальмах ЕРС циклічного руху сягають 40...60 % від витраченої електроенергії, то застосовуючи рекуперацію в таких видах тяги в мережу можна регенерувати значну частку витраченої енергії. Для сучасного ЕРС циклічного руху з плавним регулюванням повернення енергії на сьогодні може досягати 30...40 %, за рахунок рекуперації в мережу практично до зупинки (до швидкості 5 км/год) та більш високих значень експлуатаційних ККД [1].

Найважливішим етапом вирішення задачі вибору енергозберігаючих заходів окрім знання теоретичного потенціалу є визначення технічного потенціалу енергозбереження, який можна знаходити як для окремого  $i$ -го енергозберігаючого заходу в  $k$ -му ( $k = k \in K$ ) елементі (об'єкті) розглядуваної системи, так і для різних множин таких заходів  $i$ ,  $i \in I$  [264-266].

Цей потенціал може розраховуватися як в абсолютному вираженні, так і у відносних одиницях

$$\Pi_{KI}^{\text{тех}} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i}, \quad (5.5)$$

$$\Pi_{KI}^{\text{тех}} = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i}}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B T_{k_i})}, \quad (5.6)$$

де  $\Pi_{KI}^{\text{тех}}$ ,  $\Pi_{KI}^{\text{тех}}$  – 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 в умовних одиницях вимірювання;

$T_{k_i}$  – період часу, для якого розраховується зниження витрат енергії при відповідному енергозберігаючому заході.

При використанні виразів (5.7) і (5.8) для  $k$ -го елемента системи може розглядатися тільки один енергозберігаючий захід з кожної альтернативної множини.

В умовах реальної експлуатації на реалізацію теоретичного потенціалу (1.3) опосередковано впливає ряд випадкових факторів, що не входять до (1.3). Найчастіше при рекуперативному гальмуванні транспортних засобів реалізується енергія

$$W'_{\text{рек}} < W_{\text{рек}}, \quad (5.7)$$

а її нереалізована частина є надлишковою енергією, яка дорівнює

$$W_{\text{рек надл}} = W_{\text{рек}} - W'_{\text{рек}}. \quad (5.8)$$

При відсутності на ТП НЕ, ІА, або РН вона утилізується в гальмівних пристроях поїздів, що знижує ефективність системи електричної тяги.

Наявність складової  $W_{\text{рек надл}}$  пов'язана з розкидом в часі процесів споживання і генерації енергії транспортних засобів, що знаходяться одночасно на ділянках в тягових і рекуперативних режимах. Енергія  $W_{\text{рек надл}}$  особливо виражена при зниженні розмірів руху на ділянках, та в різних видах транспорту може сягати 30...100 % від власне величини (1.3).

Отже енергія рекуперації що реалізується в реальних умовах експлуатації згідно (5.7) є технічно реалізованим потенціалом енергозбереження, що дорівнює

$$\Pi^{\text{тех}} = W'_{\text{рек}} = W_{\text{рек}} k_{\text{сп}}, \quad (5.9)$$

де  $k_{\text{сп}}$  – коефіцієнт споживання енергії рекуперації (іншими транспортними засобами, що знаходяться в тягових режимах).

Величина  $k_{\text{сп}}$  при відсутності НЕ, ІА, РН на ТП належить діапазону 0...1, залежить переважно від поїзної ситуації на ділянці, напруги на шинах ближньої ТП і режимів електроспоживання поїздів в зоні рекуперації та значною мірою являє собою випадкову величину. Залежно від напруги на струмоприймачі рекуперуючого транспортного засобу  $U_c(t)$  величина  $k_{\text{вик}}$  може бути виражена як

$$k_{\text{сп}}(U_c(t)) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_c(t) < U_c^{\text{max}}, I_{\text{тяг}}(t) \geq I_{\text{рек}}(t), \\ 0, & \text{при } U_c(t) \geq U_c^{\text{max}}, I_{\text{тяг}}(t) = 0. \end{cases}$$

де  $U_c^{\text{max}}$  – гранично допустима напруга на струмоприймачі і в контактній мережі;  $I_{\text{рек}}(t)$ ,  $I_{\text{тяг}}(t)$  – відповідно струм рекуперації і тяги в зоні рекуперації.

При відсутності інтелектуальних принципів управління електроспоживанням поїздів регулювання лише їх положень шляхом оптимізації графіка руху поїздів на ділянці не може гарантовано забезпечити в зоні рекуперації одночасного збігу процесів рекуперації та електроспоживання поїздів. У такому випадку навіть при наявності систем рекуперації на всьому парку ЕРС показник відновлення енергії при існуючих розмірах і режимах руху поїздів не може перевищувати 10...20 % від значення (1.3).

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

$$I_{\text{надл. Р}} = (I_{\text{Р}} - I_{\text{Т}}) > 0, \quad (5.10)$$

$$W_{\text{надл. Р}} = \Pi^{\text{теор}} - \Pi^{\text{тех}} = \Pi^{\text{теор}}(1 - k_{\text{сп}}). \quad (5.11)$$

Таким чином, реалізація потенціалу енергозбереження при використанні процесу рекуперації енергії безпосередньо пов'язана з величиною  $k_{СП}$ , 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  $k_{СП} = 1$ , оскільки здатність системи зовнішнього електропостачання до прийому енергії  $W_{\text{надл. Р}}$  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  $k_{СП}$  від основних експлуатаційних та режимних параметрів систем тягового електропостачання (в тому числі при використанні сучасного і перспективного енергозберігаючого обладнання), де  $k_{СП}$  розглядався як функція багатьох змінних вигляду [267]

$$k_{СП} = f(U_{\text{ТП } 12}, U_{\text{вх}}, E, R_{\text{тм}}, N, P_{\text{т}}, x_{\text{р}}, x_{\text{т}}, v_{\text{ср}}), \quad (5.12)$$

де  $U_{\text{ТП } 12}$  – 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;  $P_{\text{т}}$  – тягове електроспоживання в зоні рекуперації;  $x_{\text{р}}$ ,  $x_{\text{т}}$  – 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 нейронечіткого 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. 5.1.



Таблиця 5.1 – 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. 5.1 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 визначення економічно доцільного потенціалу енергозбереження та формування на цій основі планів його реалізації. Граничною умовою економічної доцільності реалізації енергозберігаючого заходу є, як мінімум, рівність додаткових витрат (інвестиційних, експлуатаційних та ін.) за життєвий цикл, пов'язаних з реалізацією такого заходу  $Z_{ki}$  і сумарної вартості зекономлених енергоресурсів за життєвий цикл його реалізації, що формалізується в такому вигляді:

$$P_{KI}^{ек} = \sum_{t=1}^T \left( Z_{ki} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} C_t \cdot \Delta O_{kit} \right) \geq 0, \quad (5.13)$$

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

Необхідно зазначити, що технічний і економічно доцільний потенціал може змінюватися з часом, під впливом науково-технічного прогресу та економічної кон'юнктури. Однак зміни під впливом цих факторів, як правило, відбуваються протягом досить тривалого періоду.

У загальному вигляді процес оцінки потенціалу енергозбереження для систем електричного транспорту включає наступні етапи:

- а) формулювання цілей оцінки потенціалу енергозбереження;
- б) визначення переліку об'єктів і відповідних енергозберігаючих заходів (множини  $K$  і  $I$ );
- в) розробка алгоритмів оцінки потенціалу енергозбереження, який би відображав специфіку об'єкта та енергозберігаючого заходу;
- г) збір необхідної інформації для реалізації відповідних алгоритмів;
- д) розрахунок потенціалу енергозбереження.

З урахуванням специфіки розв'язуваної задачі, показник потенціалу енергозбереження ідентифікується набором класифікаційних ознак, причому деякі з них прямо залежать від особливостей досліджуваної системи.

При вирішенні практичних завдань по визначенню пріоритетів реалізації потенціалу енергозбереження та формування відповідних планів необхідно враховувати наявність обмежень, насамперед інвестиційних. Це пов'язано з тим, що не завжди виявляється можливою реалізація заходів з найбільшим технічно досяжним потенціалом енергозбереження.

Тому, для вирішення таких завдань необхідно застосування оптимізаційних моделей, які у спрощеній постановці формалізуються в наступному вигляді:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N_k} b_{kin} \cdot \Pi_{kin}^{ek} \rightarrow \max, \quad (5.14)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N_k} b_{kin} = 1, \quad (5.15)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} Z_{ki} \leq Z^{\text{sum}}, \quad (5.16)$$

де  $n$  – індекс множини альтернативних енергозберігаючих заходів;  $b_{kin}$  – булева змінна;

$Z^{\text{sum}}$  – загальний обсяг коштів на реалізацію енергозберігаючих заходів.

При освоєнні потенціалу енергозбереження при рекуперації енергії в першу чергу доцільно реалізовувати організаційно-технологічні енергозберігаючі

заходи, які не вимагають значних витрат. Одним із них є реалізація технічно доступного потенціалу зниження втрат для систем електропостачання тяги поїздів на постійному струмі за рахунок узгодженої оптимізації графіка руху поїздів і їх схем електроживлення.

Особливістю цього потенціалу є те, що він залежить від рівня втрат при фактичному стані системи енергозабезпечення і при оптимальній схемі дорівнює

$$\Pi_{KI}^{\text{ек}} = F(k_i, N^{\text{opt}}) - F(k_i, N^{\text{fact}}), \quad (5.17)$$

де  $k_i$  – коефіцієнт інтенсивності руху поїздів, що визначає завантаження обладнання підстанцій, нерівномірність навантаження та ін.;

$N^{\text{opt}}, N^{\text{fact}}$  – відповідно оптимальна та фактична схеми електропостачання.

Данні результати є основою для вибору економічно доцільних заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації, що дозволять мінімізувати вартісні показники енергозберігаючих заходів.

## **5.2. Експериментальна оцінка резервів енергозбереження при рекуперації електроенергії (на прикладі Дніпропетровського метрополітену)**

Для експериментальної оцінки потенціалу енергозбереження в Дніпропетровському метрополітені від застосування режиму рекуперації електроенергії були визначені показники витрат і генерації електроенергії відповідно в режимах тяги та електричного гальмування. У зв'язку з тим, що експлуатований парк вагонів метрополітену 81-717(714).5М не обладнаний системою рекуперації, оцінка потенціалу енергозбереження була виконана за генерованою енергії електропоїздами при реостатному гальмуванні по відношенню до витрати електроенергії на тягу.

На єдиній вітці метрополітену м. Дніпро загальної довжиною 7,1 км з 6 станціями (рис. 5.1) і середнім ухилом 8 ‰ був виконаний ряд експериментальних поїздок в штатному режимі руху електропоїздів, згідно з розробленим ре-

жимними картами і в прискореному режимі, що відповідає збільшеним розмірам руху в перспективі. У штатному режимі час руху і середня швидкість між кінцевими пунктами становили відповідно 11 хв. и 43 км/год, а в прискореному режимі 8 хв и 60 км/год. Інтервал руху поїздів в залежності від часу доби складає 7-17 хвилин.



Рисунок 5.1 – Схема Дніпровського метрополітену

Профіль Дніпровського метрополітену є знаковим, містить станції як з мілким та глибоким закладенням (рис. 5.2). Еквівалентний спрямлений профіль діючої вітки метрополітену складає ухил  $i_{\text{екв}}$  величиною 8 ‰, тобто мається спуск в напрямку ст. Комунарівська-Вокзальна і відповідний підйом в протилежному напрямку. Особливо крутими є ділянки Електродепо-Комунарівська та Комунарівська-Проспект Свободи, що є дуже сприятливим для використання режиму рекуперації електроенергії в одному з напрямів руху по них.

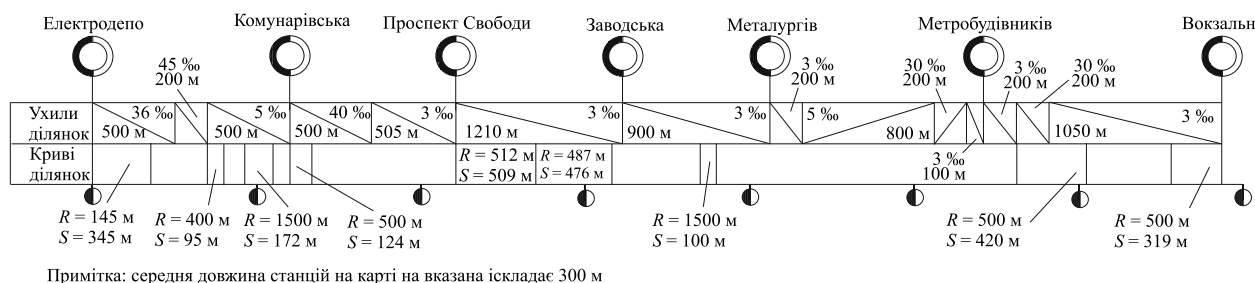


Рисунок 5.2 – План і профіль діючої вітки Дніпровського метрополітену

Дніпропетровський метрополітен є найменшим по протяжності в Україні (посідає третє місце після Київського і Харківського) та обслуговує напрям, що

з'єднує центральну частину міста і три житлових масиви. Це визначає відносно невеликий пасажиропотік даного напрямку, оскільки метрополітеном користуються переважно мешканці даних житлових районів в пікові години доби. Тому зараз потреби в перевезеннях задовольняються в основному електропоїздами що складаються з 3 вагонів. Графік та розміри руху електропоїздів в метрополітені наведені в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Організація руху електропоїздів та графік роботи метрополітену

№ п/п	Інтервал часу	Розміри руху (кількість пар поїздів)	Середній міжпоїзний інтервал, хв.
1	05:20	Подача напруги	
2	5:40 – 5:46	1	16...17
3	5:46 – 6:43	1,5	11...12
4	6:43 – 6:55	2	8...9
5	6:55 – 7:50	2,5	6...7
6	7:50 – 9:09	2	8...9
7	9:09 – 10:02	1,5	11...12
8	10:02 – 14:30	1	16...17
9	14:30 – 19:45	1,5	11...12
10	19:45 – 23:20	1	16...17
11	23:30	Зняття напруги	

Перевезення забезпечуються вагонами типу 81-717.5 і 81-717.5 М (головні) і 81-714.5 і 81-714.5 М (проміжні). Інвентарний парк вагонів складає 45 одиниць, з яких 18 – головні, з них сформовані потяги з 3 вагонів. Вагони типу 81-717(714) були розроблені в середині 1970-х років на Митищинському машинобудівному заводі, виробництво яких почалося в 1977-1978 роках. Даний тип вагонів сьогодні забезпечує більшу частину перевезень пасажирів в містах колишнього СРСР. Вагони 81-717(714).5 М, що експлуатуються в м. Дніпро, є вдосконаленою модифікацією вагонів типу 81-717(714), які випускалися з 1987 року (717(714).5) і з 1993 року (717(714).5 М). Основні технічні показники вагонів 81-717(714).5 М наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Технічні параметри вагонів метрополітену 81-717(714).5

1	Номинальна напруга і рід струму	825 В постійного струму
2	Конструкційна швидкість	90 км/год
3	Пасажиromісткість при щільності 10 чол/м <sup>2</sup>	309 (330) осіб
4	Вага тари	34 (33,5) т
5	Кількість та тип електродвигунів	4, ДК-117Д (колекторні)
6	Вихідна потужність	4 × 114 кВт
7	Прискорення при пуску	1,2 м/с <sup>2</sup>
8	Прискорення при гальмуванні	1,1 м/с <sup>2</sup>
9	Системи пуску та регулювання потужності	Реостатна, контактна
10	Електричне гальмування	Реостатне

Треба зауважити, що дана конструкція рухомого складу є досить застарілою, а відсутність рекуперації на вагонах (реостатне електричне гальмування) призводить до того, що даний рухомий склад характеризується дуже високими питомими витратами на одиницю виконаної роботи, оскільки при циклічних режимах руху поїздів метрополітенів (розгін-гальмування) втрати енергії в гальмах можуть сягати 40...60 % всієї витраченої на тягу електроенергії.

Експлуатаційні характеристики Дніпропетровського метрополітену, що не змінюються протягом року наведені в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Незмінні експлуатаційні характеристики метрополітену

Повний час ходу по перегону, $t_{ход}$		12 хв.
Час обороту по кінцевих станціях, $t_{об}$		4 хв.
Довжина лінії метрополітену, $L$		7,09 км
Довжина тупиків по кінцевих станціях, $L_{туп}$		0,672 км
Довжина вітки від депо до ст. «Комунарівська», $L_{віт}$		1,974 км
Довжина маневрових тупиків депо, $L_{туп}$		0,51 км
Середньодобовий пробіг вагонів	робочі дні, $L_{ср\ роб}$	345,48 км
	вихідні дні, $L_{ср\ вих}$	275,64 км
Середньодобовий обкатувальний пробіг, $S_{обк}$		1,39 ваг. км
Середньодобовий маневровий пробіг на паркових коліях, $S_M$		7,06 ваг. км
Пробіг вагонів за рік, $S_{рік}$		1857361,6 ваг. км
Час проходження по маршруту Депо-Комунарівська, $t_{мар}$		8 хв.

Для визначення питомої витрати електроенергії на тягу поїздів в умовах Дніпровського метрополітену розроблена відповідно нормативно-методична документація, в якості вихідних даних якої використовуються експериментально визначені величини середніх струмів вагону електропоїзду на кожній ділянці обертання, значення яких наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 – Середні струми споживання на один вагон електропоїзду

Перегін	Час руху під струмом $t$ , с	Величина струму $I$ , А	$I \cdot t$ , А·с
Комунарівська-пр. Свободи	9	290	2610
Пр.Свободи-Заводська	17	250	4250
Заводська-Металургів	12	270	3240
Металургів-Метробудівників	42	200	8400
Метробудівників-Вокзальна	9	290	2610
Вокзальна- Метробудівників	47	190	8930
Метробудівників -Металургів	17	250	4250
Металургів-Заводська	20	230	4600
Заводська-Пр.Свободи	25	210	5040
Пр. Свободи-Комунарівська	21	220	4400
$\sum t_{\text{ход}} = 248 \text{ с} = 0,069 \text{ годин}$		$\sum I_k \times t_k = 54154 \text{ А с}$	

В результаті визначення за даними значеннями струмів питомі витрати електроенергії на тягу електропоїздів становлять  $a_{\text{уд}} = 50,6 \text{ Вт} \cdot \text{г} / \text{т} \cdot \text{км}$ . Порівнюючи цей показник з середнім показником для метрополітенів [1, 2], можна зробити висновок, що перевезення у Дніпровському метрополітені є достатньо енергоємним процесом, що пояснюється в першу чергу експлуатацією рухомого складу з реостатним пуском і гальмуванням. При наявності системи рекуперативного гальмування показник  $a_{\text{уд}}$  може бути зменшений до рівня 30...40 Вт·г/т·км.

На основі затвердженої програми вимірювань (Додаток А 3) за допомогою вимірювального комплексу cDAQ-9174 виробництва National Instruments з частотою дискретизації 1 кГц були виміряні напруга на струмоприймачі  $U(t)$  і струм вагона в режимі тяги  $I(t)$ , напруга на групі двигунів  $U_{\text{дв}}(t)$  і їх струм в

режимі тяги і електричного гальмування (генераторний струм)  $I_{дв}(t)$ , а також швидкість руху електропоїзда  $v(t)$ , що складався з 3 вагонів. Принципова схема підключення безконтактних роз'ємних давачів напруг і струмів LEM до силового кола вагона наведена на рис. 5.3.

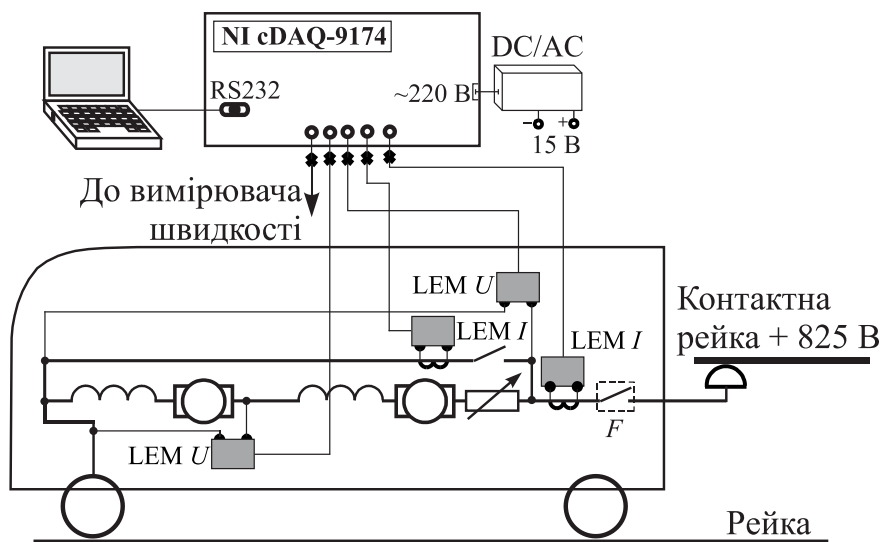


Рисунок 5.3 – Принципова схема підключення вимірювальних приладів до силового кола вагона електропоїзда 81-717(714).5М

У зв'язку з тим, що експлуатований парк вагонів Дніпровського метрополітену не обладнаний системою рекуперативного гальмування, оцінка показників ефективності рекуперації була виконана за генерованою енергією електропоїздом при реостатному гальмуванні. Для режиму реостатного гальмування на електропоїздах використовується мостова схема з самозбудженням і перехресною схемою живлення обмоток збудження тягових двигунів. Схема приєднання давачів LEM для вимірювання параметрів генерації енергії в режимі реостатного гальмування вагону наведена на рис. 5.4.



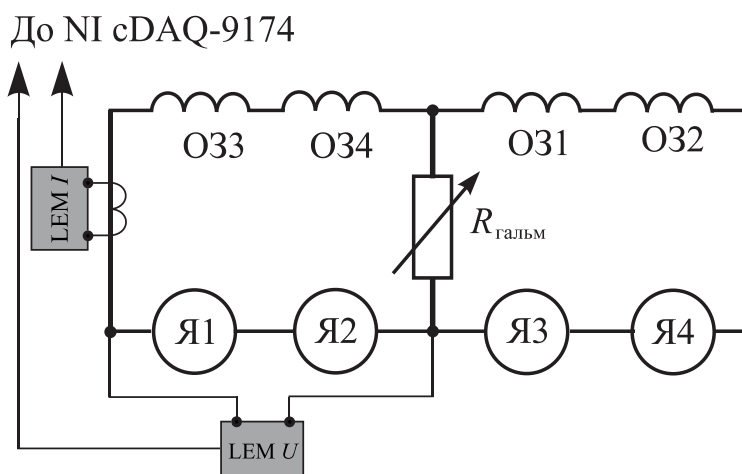


Рисунок 5.4 – Схема вимірювання параметрів генерації енергії в колі тягових електродвигунів при реостатному гальмуванні вагону 81-717(714).5М

На рис. 5.5 і 5.6 представлені результати синхронізованих вимірювань параметрів споживання і генерації електроенергії вагоном електропоїзду 81-717(714).5М у прискореному режимі руху і по режимній карті в напрямку ст. метро Вокзальна, а на рис. 5.7 і 5.8 ті ж осцилограми при русі у зворотному напрямку де рекуперації електроенергії відповідає режим при  $I_{\text{дв}}(t) < 0$  (генераторний режим тягових електродвигунів).

Оскільки на вагонах метрополітену відсутні лічильники електроенергії то для оцінки витрат і рекуперації електроенергії за результатами вимірних осцилограм були визначені витрати та генерація електроенергії в режимі тяги і електричного гальмування потяга за час поїздки  $T$  за виразами

$$W_{\text{тяг}} = m \int_0^T U(t) I(t) dt, \quad W_{\text{рек}} = m \sum_{i=1}^n \int_{t_{\text{ні}}}^{t_{\text{кі}}} 2U_{\text{дв}}(t) I_{\Gamma}(t) dt, \quad (5.18)$$

де  $m$  – число вагонів в електропоїзді,

$t_{\text{ні}}, t_{\text{кі}}$  – відповідно моменти початку та закінчення електричного гальмування,

$n$  – кількість зупинок.

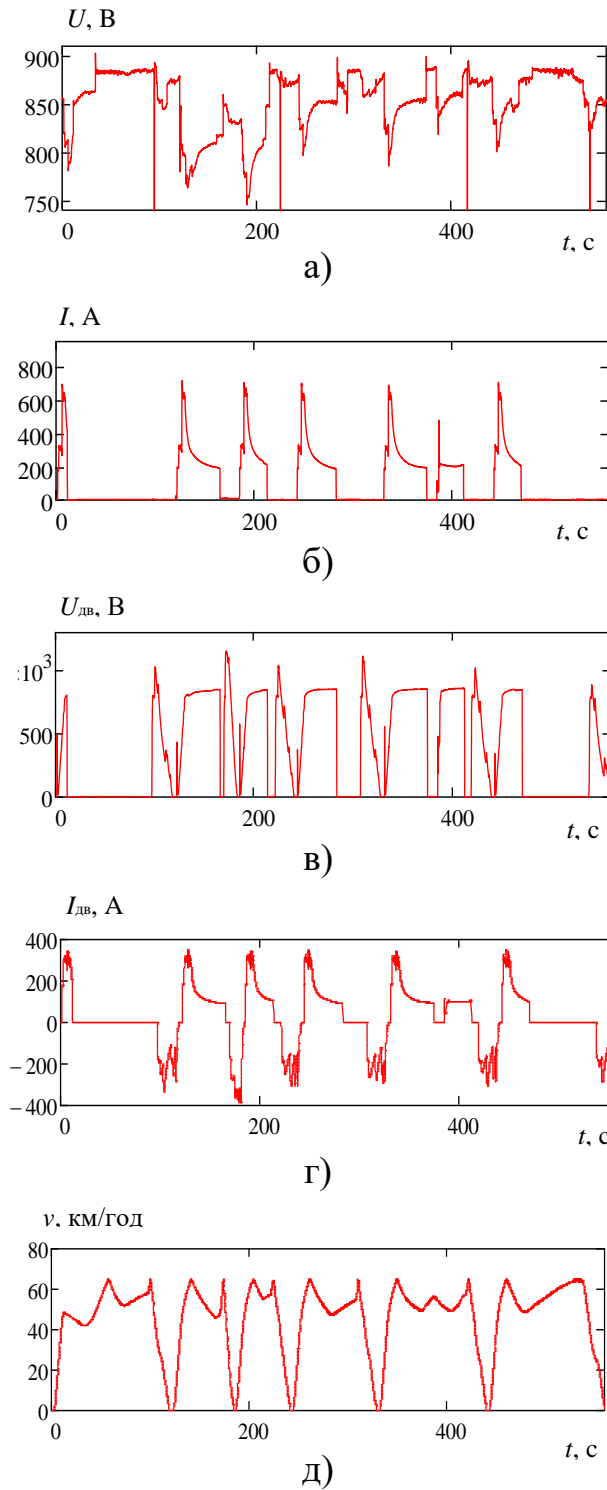


Рисунок 5.5 – Параметри електроспоживання, генерації і руху поїзда в прискореному режимі

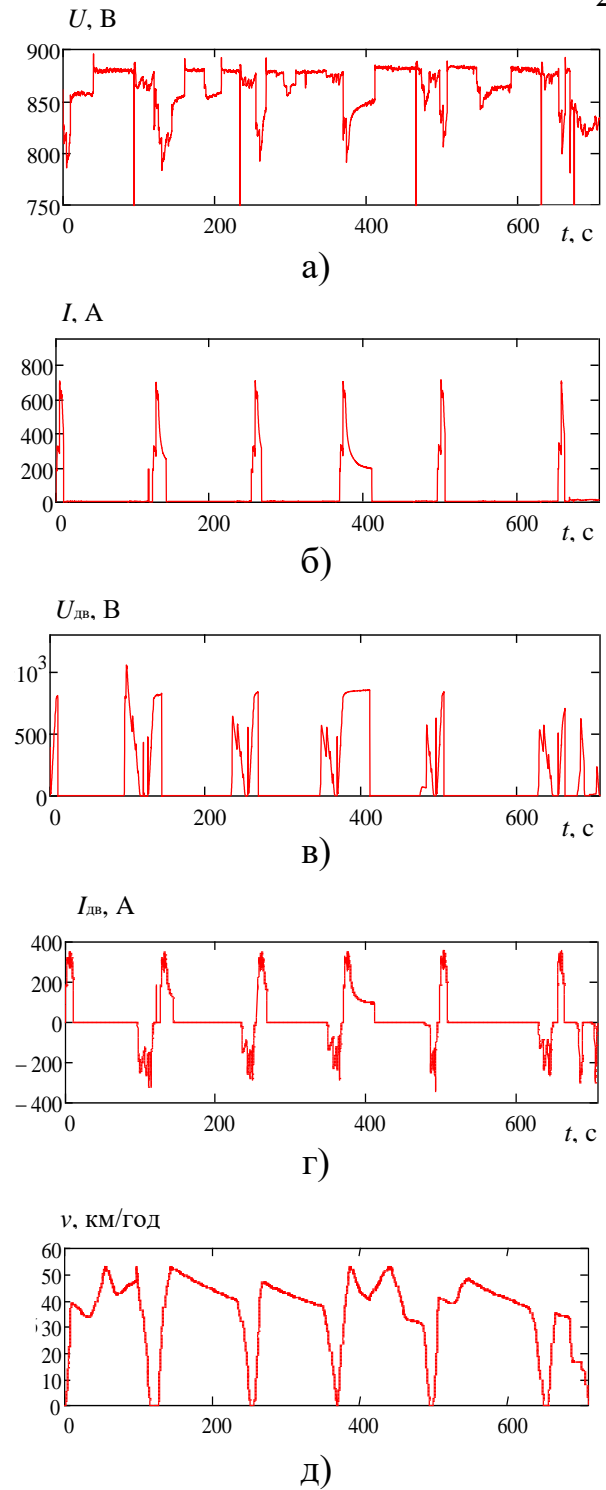
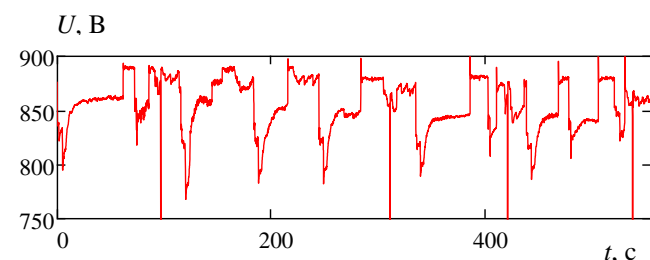
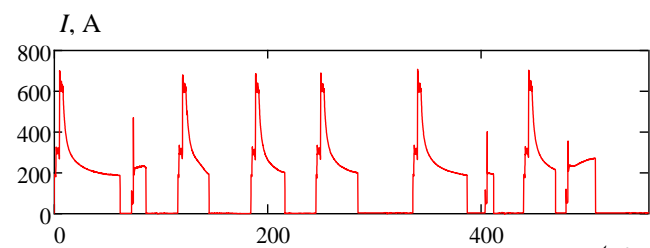


Рисунок 5.6 – Параметри електроспоживання, генерації і руху поїзда за режимною картою

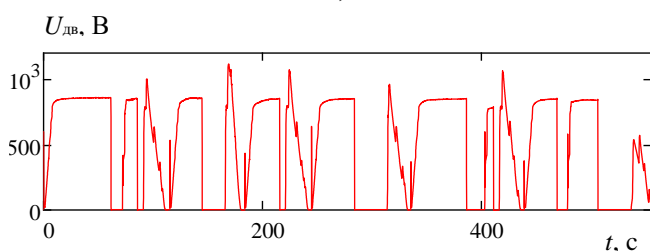
а – напруга на струмоприймачі  $U(t)$ , б – тяговий струм  $I(t)$ , в – напруга групи двигунів  $U_{дв}(t)$ , г – струм групи двигунів  $I_{дв}(t)$ , д – швидкість руху вагона  $v(t)$



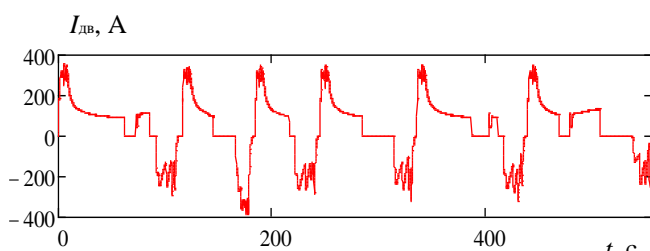
а)



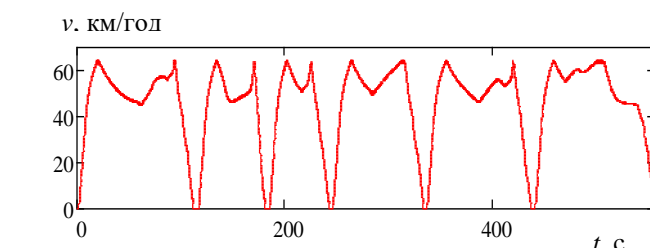
б)



в)

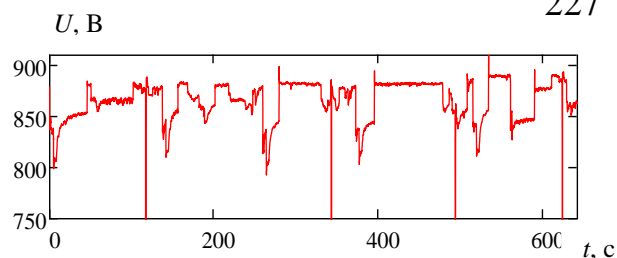


г)

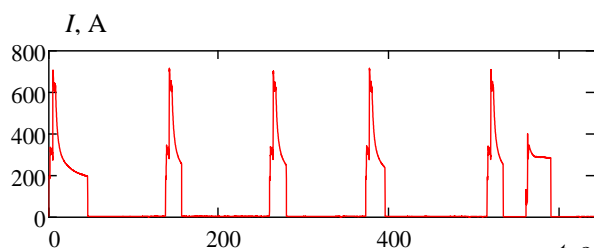


д)

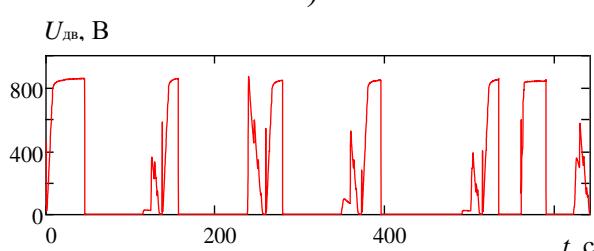
Рисунок 5.7 – Параметри електроспоживання, генерації і руху поїзда в прискореному режимі



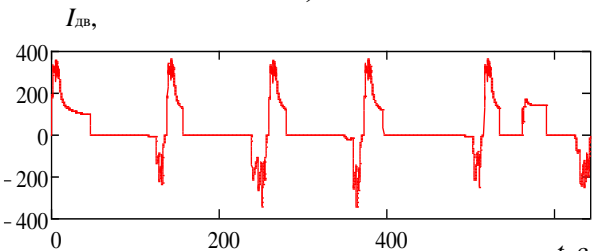
а)



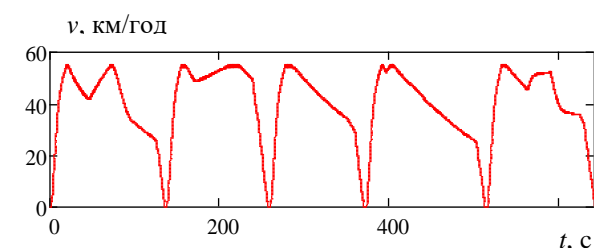
б)



в)



г)



д)

Рисунок 5.8 – Параметри електроспоживання, генерації і руху поїзда за режимною картою

а – напруга на струмоприймачі  $U(t)$ , б – тяговий струм  $I(t)$ , в – напруга групи двигунів  $U_{дв}(t)$ , г – струм групи двигунів  $I_{дв}(t)$ , д – швидкість руху вагона  $v(t)$

За показник потенціалу рекуперації електроенергії при електричному гальмуванні електропоїзди був прийнятий коефіцієнт рекуперації електроенергії, рівний відношенню генерується при електричному гальмуванні енергії до загальної витраті енергії

$$k_{\text{рек}} = \frac{W_{\text{рек}}}{W_{\text{тяг}}} \quad (5.19)$$

Результати розрахунків наведені в табл. 5.6 [268, 269].

Таблиця 5.6 – Результати розрахунку потенціалу рекуперації електроенергії

Напрямок	Режим руху							
	По режимній карті				Прискорений			
	$W_{\text{тяг}}$ , кВт·год	$W_{\text{рек}}$ , кВт·год	$k_{\text{рек}}$	$v_{\text{ср}}$ , км/год	$W_{\text{тяг}}$ , кВт·год	$W_{\text{рек}}$ , кВт·год	$k_{\text{рек}}$	$v_{\text{ср}}$ , км/год
Вокзальна- Комунарівська	36,52	5,25	0,144	40	56,12	18,95	0,338	46
Комунарівська- Вокзальна	26,44	10,15	0,384	36	43,15	22,27	0,516	45

На сам кінець необхідно відзначити, що хоча і в прискореному режимі потенціал рекуперації електроенергії перевищує потенціал при русі по режимній карті, однак питоме електроспоживання на тягу в прискореному режимі на 19,24 % у напрямку ст. метро Комунарівська і на 36,46 % у напрямку ст. метро Вокзальна перевищує питоме електроспоживання при русі по режимній карті. Це пояснюється тим, що середня швидкість в прискореному режимі в порівнянні з рухом по режимній карті вище на 30 % і на відповідний відсоток менше час ходу по ділянці.

### 5.3. Удосконалення системи обліку енергії рекуперації на залізницях постійного струму

Розробка дієвих заходів підвищення ефективності рекуперації електроенергії в системі електричної тяги потребує всебічної повноти інформації про кількісні показники обсягів рекуперації електроенергії на всіх можливих рівнях її

аналізу, зокрема на відповідних ділянках обертання РС, що дозволить встановлювати вплив на рівень рекуперації параметрів тягового електропостачання та організації руху поїздів. Оскільки існуюча на сьогодні система обліку енергії рекуперації не дозволяє враховувати зазначені фактори, то розробка принципів підвищення ефективності аналізу об'ємів повернення електроенергії в контактну мережу при рекуперативному гальмуванні РС постійного струму є актуальним напрямом досліджень.

Розв'язання даної задачі потребує виконання моніторингу поточного стану кількісних показників рекуперації енергії у приміському сполученні, аналіз чинників, що впливають на її обсяги та вдосконалення на базі цього принципів обліку енергії рекуперації поїздів.

В роботі [270] розглядаються принципи удосконалення методів розрахунку витрати електричної енергії постійного струму в зонах обліку за приладами, встановленими на фідерах контактної мережі тягових підстанцій та РС. Пропонується метод розрахунку витрати електричної енергії на тягу РС з використанням навігаційної системи і бази даних про межі ділянок роботи локомотивних бригад. В результаті в роботі отримано значно спрощену методику розрахунку споживання електричної енергії за зонами обліку, визначення рівня небалансу на тягу поїздів в межах зон небалансу і тарифних зон, однак у методиках не враховані похибки вимірювальних приладів та приналежність РС до інших залізниць. У роботах [271-276] сформульовано рекомендації щодо підвищення ефективності системи обробки маршрутів машиністів в частині обліку витрати енергії на тягу поїздів, у тому числі запропонований спосіб розрахунку витрат енергії на тягу поїздів за поїздку з урахуванням фактичної витрати електроенергії на опалення пасажирських вагонів на шляху прямування, що дозволяє підвищити точність і об'єктивність нормування енерговитрат. Запропоновані форми таблиць даної роботи відрізняються від існуючих наявністю показників динаміки енергоспоживання і результатів витрати і рекуперації енергії в розрахунку на локомотивну бригаду. У [277] запропоновано дослідження динамічних похибок вимірювання витрат енергії на тягу РС методами теорії випадкових

функцій. При різкозмінних режимах електроспоживання РС можливе зростання динамічної похибки вимірювання витрат електроенергії, тому показання лічильників постійного струму в таких режимах можуть перевищувати їх похибку, що регламентується у статичному режимі електроспоживання.

На сьогодні існує ряд об'єктивних і суб'єктивних чинників, що стримують використання режимів рекуперативного гальмування в тязі поїздів. Її використання торкається інтересів багатьох служб залізниці, а саме: руху, електропостачання, локомотивної, колії, вагонного господарства, автоматики, телемеханіки та зв'язку. Різні підрозділи залізниць мають як позитивні, так і негативні наслідки впливу даного виду електричного гальмування на їх експлуатаційні показники.

При всіх існуючих негативних проявах режиму рекуперативного гальмування системний ефект від використання рекуперації на РС є безперечним, а розвиток і покращення умов рекуперативного гальмування поїздів будуть проводитися на всьому подальшому періоді експлуатації електричної тяги.

Аналіз ефективності рекуперації за даними маршрутних листів машиністів (ММ) заснований на порівняльній оцінці показників результативності повернення електроенергії на різних рівнях інтеграції даних про енергоспоживання: на рівні залізниці (рис. 5.9, а) і на рівні локомотивних депо (рис. 5.9, б).

Першоджерелом даних про експлуатаційну роботу, витрати енергії на тягу та повернення електроенергії при рекуперативному гальмуванні є ММ. Початкова обробка цих даних виконується в локомотивних депо у спеціалізованій автоматизованій системі АРМ «ЛокБриг», після чого вони поступають до інформаційно-обчислювальних центрів залізниць. Дані АРМ «ЛокБриг» служать основою для складання звітних форм ТХО-1, ТХО-2 і ТХО-9, які можуть бути використані при проведенні аналізу ефективності застосування рекуперації по напрямкам окремої залізниці або мережі залізниць.

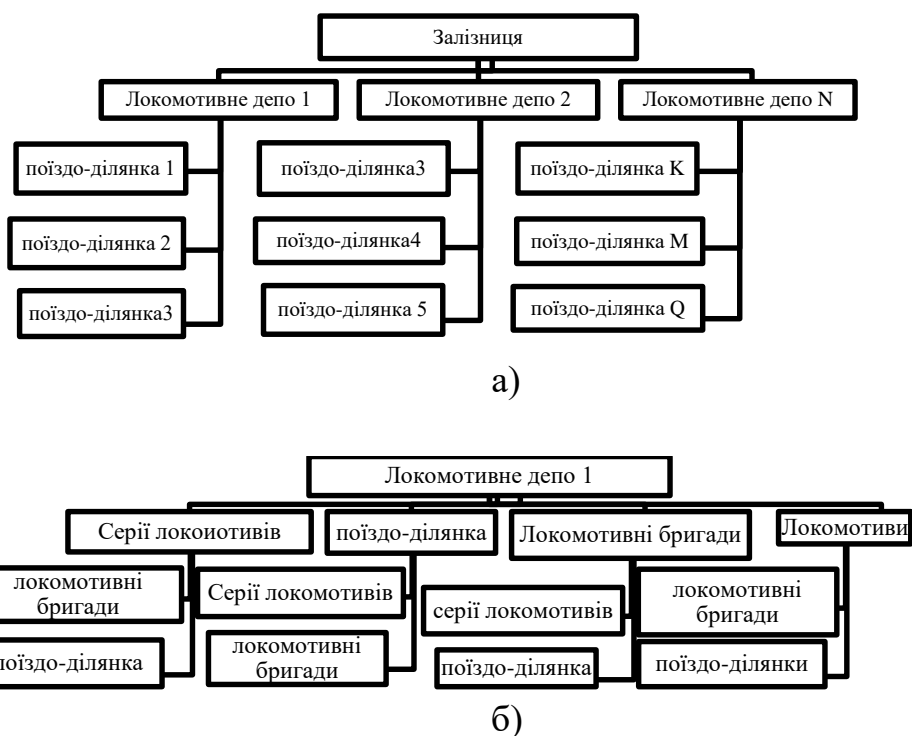


Рисунок 5.9 – Рівні аналізу ефективності рекуперації: а – залізниця; б – локомотивне депо

Сучасні системи обліку електроенергії в режимах тяги і рекуперації не відрізняються і включають в себе наступні основні етапи що представлені на рис. 5.10.

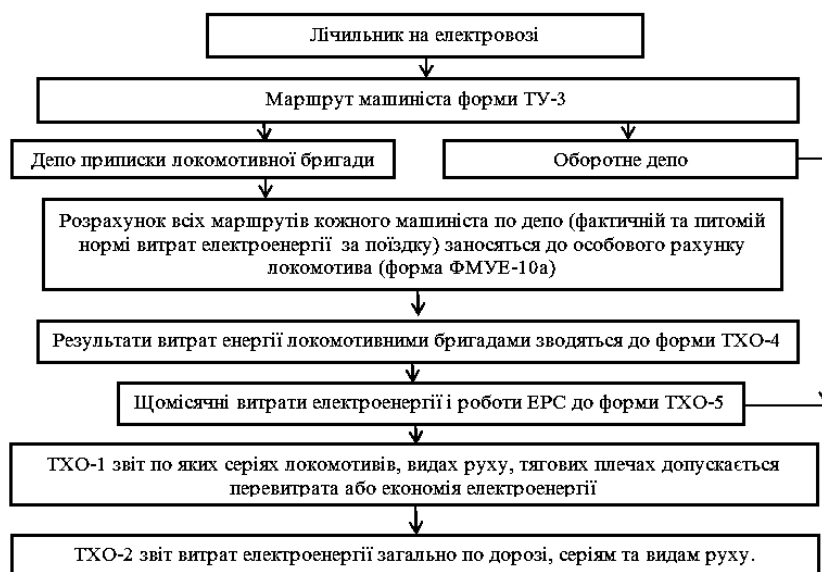


Рисунок 5.10 – Структура обліку енергії рекуперації

На основі звітів ТХО-1 розробляється звіт ТХО-2 про витрати електроенергії в цілому по дорозі, по серіям та видам руху. В ньому визначається показники витрат на одиницю пробігу, на одиницю роботи тонно-кілометру брутто, на одиницю ваги потягу та процент економії по окремим серіям електровозів і видам руху.

Данна система обліку має наступні недоліки [278-284]:

1. Змішування розрахунків що проходять багатоступінчасту структуру переробки інформації і показників лічильника;

2. Відсутність розділу на зони балансової приналежності. При роботі РС на довгих тягових плечах, що відносяться до різних залізниць, норми витрати електроенергії для локомотивних бригад розраховуються на поїзну роботу по плечах, незалежно від того, закінчується це плече в межах залізниці або за її межами.

В даній роботі моніторинг обсягів повернення енергії при рекуперації було виконано для приміського руху електропоїздів ЕПЛ2Т, що експлуатуються в депо Дніпропетровськ (РПЧ-1) Придніпровської залізниці і обладнані системою рекуперативно-реостатного гальмування. До аналізу було залучено всі основні напрями обертання електропоїздів депо, а саме П'ятихатки, Чаплине, Лозова, Кривий Ріг, Донецьк. При аналізі було оброблено 2150 ММ за період 2015 р. Сумнівні показання лічильників тяги і рекуперації (несправний лічильник режиму тяги або рекуперації або його відсутність, випадкове або навмисне спотворення показань) у статистичному матеріалі за даними ММ при аналізі не розглядалися.

Встановлення лічильників дозволяє вести облік і контроль електроенергії на РС, але при аналізі їх показань існують деякі похибки, які пов'язані з тим, що у тяговому режимі лічильник тяги вимірює не тільки витрату енергії на тягу, але і витрату енергії на власні потреби і опалення салонів поїздів.

В якості показника оцінки використання режиму повернення електроенергії застосовується так званий коефіцієнт рекуперації – відношення енергії рекуперації на  $i$ -му рівні дослідження, до енергії, витраченої на тягу



$$k_i^e = \sum_{m=1}^n W_{Rm} / \sum_{m=1}^n W_{Am}, \quad (5.20)$$

де  $W_{Rm}$  – величина повернення електроенергії при рекуперативному гальмуванні за даними ММ, кВт·год;

$W_{Am}$  – повна витрата електроенергії по ММ, кВт·год;

$n$  – кількість досліджуваних ММ.

На рис. 5.11 наведені статистичні розподіли та основні імовірнісні характеристики витрати енергії на тягу, енергії рекуперації та коефіцієнта рекуперації електропоїздів ЕПЛ2Т що усереднені по всіх ділянках депо РПЧ-1 за період 2014 р.

За номерами електропоїздів ЕПЛ2Т приписки депо РПЧ-1 існує суттєвий розкид значень енергії рекуперації (рис. 4.10), що може пояснюватися в тому числі роботою даних електропоїздів на ділянках з несприятливими умовами рекуперації.

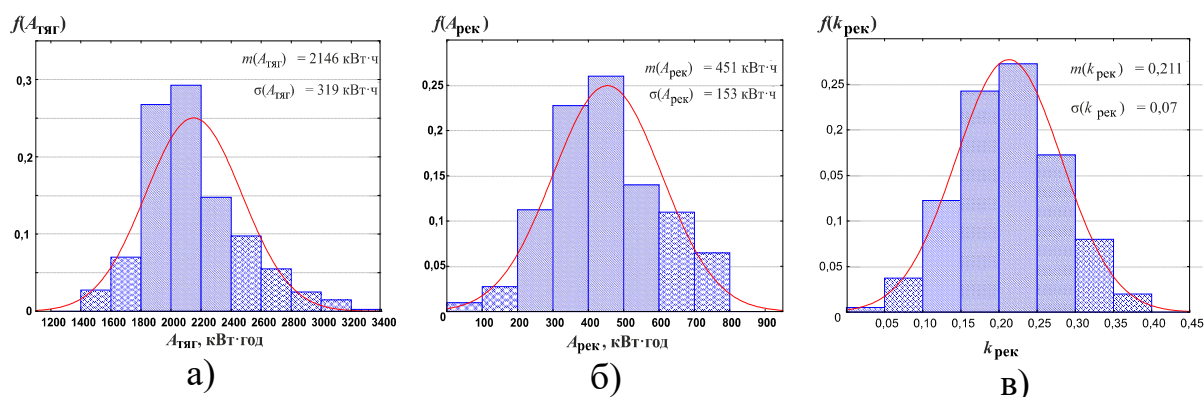


Рисунок 5.11 – Статистичні розподіли витрати енергії на тягу (а), енергії рекуперації (б) та коефіцієнта рекуперації (в) електропоїздів ЕПЛ2Т депо РПЧ-1

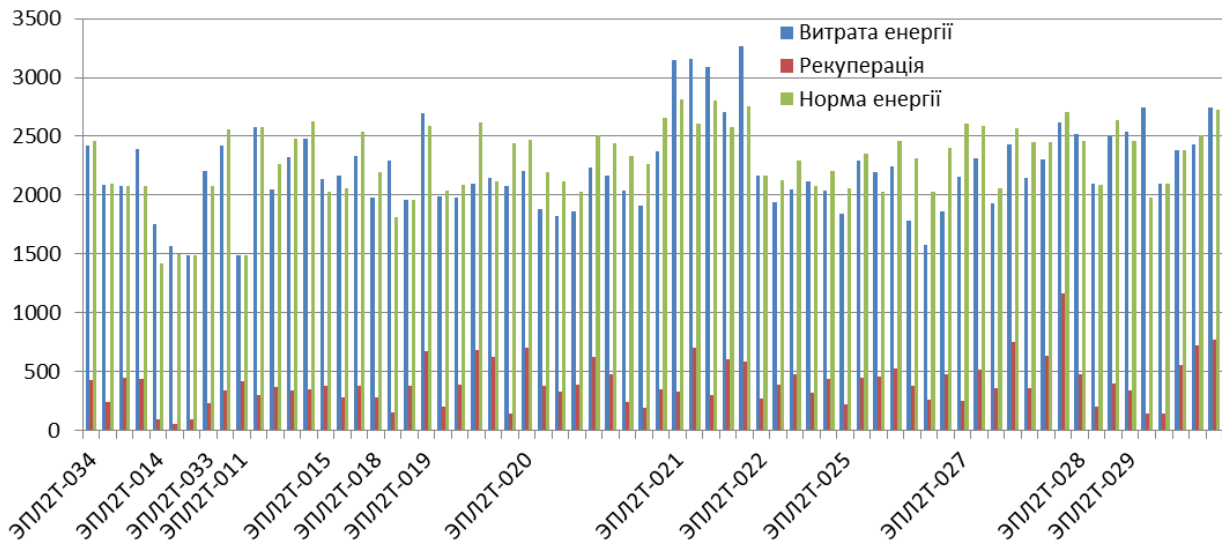


Рисунок 5.12 – Діаграма витрат і рекуперації енергії РС та їх норми

Ефективність обліку енергії рекуперації на приміських електропоїздах ускладнена тим, що дуже часто одна зміна локомотивної бригади може мати декілька маршрутів. При цьому зняття показань лічильників здійснюється загальною за всі поїздки. В такому випадку ускладнено визначення впливу напрямку слідування на кількісні показники рекуперації енергії.

Наявність випадків недостовірних результатів даних по ММ (несправний лічильник або його відсутність, випадкове або навмисне перекручування його показань) може призвести до отримання некоректних значень цього показника і до невірних висновків за результатами аналізу. Тому більш раціональним показником ефективності застосування рекуперативного гальмування в [281] вважається так звана питома рекуперація – відношення величини повернення електроенергії до тонно-кілометрової роботи:

$$k_i^{QL} = \sum_{m=1}^n W_{Rm} / \sum_{m=1}^n (QL)_m, \quad (5.21)$$

де  $(QL)_m$  – тоннокілометрова робота,  $10^4$  ткм бруто.

Також в [281] пропонується оцінювати об'ємний показник застосування рекуперативного гальмування в цілому по структурному підрозділу (залізниці) за величиною частки тонно-кілометрової роботи за ММ з використанням рекуперації до роботи в цілому по виду тяги у вигляді

$$\gamma_p = \frac{\sum_{m=1}^{n_p} (QL)_m}{\sum_{m=1}^n (QL)_m}, \quad (5.22)$$

де  $n$  – загальна кількість ММ в цілому по виду тяги;

$n_p$  – кількість ММ з рекуперацією.

За даними форм ТХО-1 виконується ретроспективний статистичний аналіз енерговитрат за рівнями нормування у спадаючому порядку: вид руху → серія локомотива → поїздо-ділянка → категорія потягів.

Аналіз ефективності обліку енергії рекуперації включає в себе наступні основні етапи:

- на підготовчому етапі вирішуються організаційні питання, проводиться ознайомлення з ділянками роботи локомотивних бригад і структурою споживання енергії на тягу поїздів;

- безпосередньо енергетичне обстеження, в ході якого проводиться збір інформації про роботу локомотивів та споживанні енергії на тягу поїздів в локомотивних депо дороги, а також складання карт споживання енергії на тягу поїздів по серіях локомотивів і видами руху, по непродуктивним витратам енергоресурсів і основним експлуатаційним показниками, які впливають на тягове енергоспоживання [278].

Виходячи з цього можна сказати, що система обліку енергії рекуперації – це зіставлені таблиці в програмі Excel, де коефіцієнти для підрахунків отримують безпосередньо з головного управління Укрзалізниці. Які відправляються з управління локомотивного депо в управління Придніпровської дороги, а далі до Укрзалізниці.

Підчас дослідження даної проблеми були отримані наступні дані з ММ депо РПЧ-1:

- напрямок (ділянка);
- дата поїздки;
- серія, номер електропоїзда;
- ПІБ машиніста;
- кількість спожитої і рекуперованої енергії за поїздку;

– норма витрати і рекуперації енергії на ділянці.

Витрати електроенергії на тягу поїздів по Придніпровській залізниці за 12 місяців 2015 року в розрізі моторвагонних депо згідно форми ТХО-2 представлено в табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Витрати електроенергії на тягу поїздів по Придніпровській залізниці

Локомот. депо	Робота, млн.ткм бр	Норма енергії рекуперації, кВт г/10 тис.ткм. бр	Витрати електроенергії, тис.кВт год		Фактичні витрати, тис.кВт год		Питомі витрати, кВт год/10 тис.ткм. бр	Економія (-) перевитрати(+)			
			з втратами	без втрат	з втратами	без втрат		з втратами		без втрат	
								тис. кВт год	%	тис. кВт год	%
РПЧ-1	1660,07	209,53	34783,5	29601,1	34700,4	29400	209,03	-83,58	-0,3	-201	-0,7
РПЧ-2	293,85	173,78	5106,61	4343,52	4844,24	4104	164,85	-262,4	-5,1	-239	-5,5
РПЧ-3	644,71	207,9	13403,5	11417,1	13218,9	11211	205,04	-184,6	-1,4	-206	-1,8
РПЧ-4	91,29	238,01	2172,79	1812,11	2114,40	1792	231,61	-58,39	-2,7	-20,1	-1,1
НРП 2014	2689,92	205,53	55285,4	47016,3	54877,9	46507	204,01	-407,5	-0,7	-509	-1,1
НРП 2013	3182,21	213,977	68092,2	58532,8	67447,5	57447	211,95	-	-	-	-

Робота по відношенню до минулого року зменшилась на 15,47 % при цьому витрати електроенергії зменшились на 19,04 %. Планова питома норма зменшена по факту минулого року на 3,95 %. Фактичні питомі втрати зменшились до минулого року на 3,75 %, та до плану на 0,7 %.

Рекуперация при планованих обсягах на 2015 рік 4264,0 тис. кВт·год (РПЧ-1 – 4143,0 тис. кВт·год; РПЧ-3 – 121,0 тис. кВт·год) фактично склала 4256,94 тис. кВт·год (РПЧ-1 – 4137,9 тис. кВт·год; РПЧ-3 – 117,8 тис. кВт·год; РПЧ-4 – 1,24 тис. кВт·год). Недовиконання плану склало 7,1 тис. кВт·год. По РПЧ-1 питома рекуперация збільшилась у порівнянні до 2016 року на 2,38 кВт·год/10 тис.ткм.бр [284-287].

По РПЧ-3 питома рекуперация відносно минулого року зменшилась на 0,11 кВт·год/10 тис.ткм.бр.(с 1,94 кВт·год/10 тис.ткм.бр. у 2014 р. до 1,83 кВт·год/10 тис.ткм.бр. у 2015 р.). Причиною зменшення питомої рекуперації по РПЧ-3 є підвищення напруги в контактній мережі (до 3,8...3,9 кВ) на ділянці Якимівка-Сиваш, при якій не збирається схема рекуперації, при тому що ця ділянка є од-

нією з основних для здійснення рекуперативного гальмування за рахунок наявності значного ухилу.

Аналіз нормативної документації показав, що в системі обліку енергії рекуперації на залізничному транспорті є недосконалою в частині оцінювати ефективності рекуперації на ділянках експлуатації РС, оскільки на кількісні показники енергії рекуперації суттєво впливає низка експлуатаційних і технічних факторів, таких як розміри і організація руху поїздів, рівень напруги на шинах тягових підстанцій і т. д. Введення додаткових показників дає можливість вирішити цю проблему, вдосконалити систему оцінювання показників якості рекуперативної енергії та знайти шляхи підвищення енергетичної та економічної ефективності застосування рекуперативного гальмування.

## Висновки до розділу 5

1. Запропоновано визначати потенціал енергозбереження в системах електрифікованого транспорту при рекуперації залежно від коефіцієнта споживання енергії рекуперації  $k_{\text{сп}}$  та досліджено його залежність від експлуатаційних та режимних параметрів системи тягового електропостачання. Визначено діапазон можливих значень технічно реалізованої величини  $k_{\text{сп}}^{\text{тех}}$  при потенційній реалізації різних енергозберігаючих заходів з підвищення ефективності споживання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту. Данні результати є основою для вибору економічно доцільних заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації, що дозволять мінімізувати вартісні показники енергозберігаючих заходів.

2. Визначено теоретичний потенціал енергозбереження для Дніпровського метрополітену, який становить відповідно 14...34 % в прямому (на підйомі 8 ‰) і 38...52 % у зворотному (на відповідному узвозі) напрямках, тобто в середньому 26...43 % від електроспоживання на тягу поїздів. На сьогодні цей резерв реалізовувати економічно недоцільно у зв'язку з малими розмірами руху поїздів (1-2,5 пар поїздів).

3. Встановлено, що в система обліку енергії рекуперації на залізничному транспорті є недосконалою в частині оцінювання ефективності рекуперації на ділянках експлуатації ЕРС, оскільки не враховується впливає на кількісні показники енергії рекуперації експлуатаційних і технічних факторів, таких як розміри і організація руху поїздів, рівень напруги на шинах тягових підстанцій та ін. Врахування даних показників дає можливість вдосконалити систему нормування енергії рекуперації на ділянках.

**Матеріали розділу опубліковано в [267-269, 277, 285-288].**

## РОЗДІЛ 6

### РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ПО ПІДВИЩЕННЮ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

#### 6.1. Оптимізація транспортного потоку з урахуванням використання енергії рекуперації

Принцип підвищення ефективності споживання енергії рекуперації в системі тягового електропостачання за рахунок вибору оптимальної послідовності відправлення поїздів можна сформулювати так: з можливих варіантів відправлення поїздів різних категорій необхідно вибрати таку послідовність, якій відповідає мінімальне значення втрат енергії рекуперації згідно (4.23).

Принцип зменшення втрат енергії рекуперації за рахунок вибору оптимальних інтервалів між поїздами формулюється наступним чином: з множини можливих значень інтервалів між поїздами необхідно вибрати такі, при яких значення втрат енергії рекуперації буде мінімальними.

В умовах оперативного управління рухом поїздів виникає необхідність застосування такого методу оптимізації, який дозволяє швидко здійснювати вибір великої кількості можливих ГРП в залежності від регулювання наступних параметрів [28, 146-150]:

- послідовності відправлення поїздів різних категорій;
- інтервалів між поїздами;
- взаємного розташування поїздів на двоколійних ділянках.

В процесі руху поїздів оптимальні відстані між поїздами змінюються в кожен момент часу. Для побудови ГРП необхідно визначити часові інтервали між поїздами, при яких втрати енергії рекуперації будуть мінімальними. Якщо  $v_{cp}$  – середня швидкість руху, то оптимальний міжпоїзний інтервал визначається з умови:

$$J_{\text{опт}} = \frac{l_{\text{опт}}}{v_{\text{cp}}}, \quad (6.1)$$

Для розв'язання задачі скористаємося евристичним алгоритмом пошуку мінімуму функції. Нехай необхідно пропустити по дільниці  $n$  поїздів різних категорій. Введемо поняття категорії поїзда, яке являє собою характеристику поїзда з різною масою, серії електровоза і тип поїзда. Для кожного варіанту послідовності пропуску поїздів різних категорій визначаються надлишкова енергія рекуперації  $W_{\text{рек надл}}$  [30, 215]. Виникає завдання визначення такої послідовності пропуску поїздів, при якій досягається мінімум функції надлишкової енергії рекуперації:

$$C = f(W_{\text{рек надл}}) \rightarrow \min. \quad (6.2)$$

В роботі [150] введено поняття функції послідовності, яке полягає в тому, що деякій послідовності  $[w_1, w_2, \dots, w_n]$  за певним правилом  $F$  зіставляється дійсне число.

Так, якщо  $w_i$  –  $i$ -я категорія поїзда та  $i = \overline{1, 4}$ , то в даному випадку всього послідовностей пропуску поїздів буде  $n! = 24$  варіанти, а кожному варіанту пропуску поїздів зіставляється певне значення величини надлишкової енергії рекуперації:

$$\left. \begin{array}{l} [w_1, w_2, w_3, w_4] \rightarrow \Delta W_1, \\ [w_2, w_1, w_3, w_4] \rightarrow \Delta W_2, \\ \dots \\ [w_4, w_3, w_2, w_1] \rightarrow \Delta W_{24}. \end{array} \right\} \quad (6.3)$$

Основою евристичного алгоритму є елементарна операція варіації послідовності (списку). Нехай задано список  $L' = [w_1, \dots, w_n]$ , тоді елементарну операцію можна записати у вигляді

$$L' \otimes (i, j), \quad (6.4)$$

де елементи  $w_i, w_j$  міняються місцями.



Наприклад, для списку, що складається з 4 різних елементів  $L' = [w_1, w_2, w_3, w_4]$ , використовуючи варіацію списку  $(i, j) = (1, 3)$ , отримуємо новий список:

$$[w_1, w_2, w_3, w_4] \otimes (1, 3) = [w_3, w_2, w_1, w_4]. \quad (6.5)$$

У співвідношенні (6.5) і можемо приймати значення в загальному випадку від 1 до  $n-1$ ,  $j$  – від 2 до  $n$ . Тоді елементарних варіацій буде  $\frac{n(n-1)}{2}$ .

В табл. 6.1 показана зведена інформація про кількість елементарних операцій і загальному числі варіацій списку для двох варіантів списків.

Як видно з табл. 6.1 у разі  $n \approx 4 \div 5$  мінімум можна знайти безпосереднім перебором, але коли  $n = 10$ , то все варіантів буде  $N = 3628800$ , тоді для розв'язку даної задачі з'являється необхідність застосування евристичного алгоритму пошуку мінімуму функції послідовності.

Таблиця 6.1 – Кількість елементарних операцій і загальне число варіацій списку для двох варіантів списків

Показник	$n = 4$	$n = 10$
Загальна кількість елементарних варіацій	$\frac{n(n-1)}{2} \Big _{n=4} = 6$	$\frac{n(n-1)}{2} \Big _{n=10} = 45$
Загальна кількість варіацій послідовності	$n! = 24$	$n! = 3628800$

Зміст евристичного алгоритму є наступним:

1. Задаємо первісну послідовність  $L' = [w_1, \dots, w_n]$ . Для неї визначаємо значення цільової функції  $F(L') = \Delta W_{\text{пек}}$ . Вписуємо ці дані в клітинки:

$$\left. \begin{aligned} f_{\min} &= F(L'), \\ L'_{\min} &= L'. \end{aligned} \right\} \quad (6.6)$$

2. За допомогою операції (6.6) отримуємо зі списку  $L' = [w_1, \dots, w_n]$  набір послідовностей  $L'_1$ . Наприклад, для списку  $L' = [w_1, w_2, w_3, w_4]$  отримуємо набір  $L'_1$ , складається з 6 списків:

$$\left. \begin{array}{l} 1, [2, 1, 3, 4], \\ 2, [3, 2, 1, 4], \\ 3, [4, 2, 3, 1], \\ 5, [1, 4, 3, 2], \\ 6, [1, 2, 4, 3]. \end{array} \right\} \quad (6.7)$$

3. З отриманого набору визначаємо список  $L_1^*$ , при якому функція  $F(L') = \Delta W_{\text{рек}}$  приймає мінімальне значення. Якщо  $F(L_1^*) < f_{\min}$ , то запишемо отримані дані в спеціальні комірки:

$$\left. \begin{array}{l} f_{\min} = F(L_1^*), \\ L_{\min} = L_1^*. \end{array} \right\} \quad (6.8)$$

і переходимо до п. 4.

У протилежному випадку переходимо до п. 4.

4. Піддаємо список  $L_1^*$  елементарній варіації (6.6) і отримуємо новий набір  $L'_2$ . У ньому також знаходимо список  $L_2^*$  з мінімальним значенням цільової функції  $F$ .
5. Виконуємо порівняння: якщо  $F(L_2^*) < f_{\min}$ , то замінюємо  $f_{\min}$  на  $F(L_2^*)$ , а  $L'_{\min}$  на  $L_2^*$  і повертаємося до п. 1. У зворотному випадку переходимо до п. 5.
6. Коли буде виконуватись умова  $F(L_n^*) > f_{\min}$ , закінчуємо обчислення. В якості відповіді видаються значення  $f_{\min}$  і  $L_{\min}$ .

Графічну інтерпретація процесу пошуку мінімуму функції послідовності зображено на рис. 6.1. Причому,  $F(L_m^j) = \min_{1 \leq i \leq m} F(L_i)$ .

$$F(L) > F(L_1^j) > F(L_2^j) > \dots > F(L_m^j). \quad (6.9)$$

Даний алгоритм дозволяє знаходити локальні мінімуми функції. Для визначення глобального мінімуму функції алгоритм пропонується використовувати не менше трьох разів, змінюючи початкові умови – починаючи з першого елемента списку варіантів, з серединного і останнього.

Одним з рішень задачі підвищення ефективності використання енергії рекуперації в тяговій мережі є розробка такого ГРП, при якому здійснюється пропуск заданих розмірів руху з найбільшим показником  $k_{\text{сп}}$ , тобто забезпечення напруги на струмоприймачах поїздів при рекуперації в області допустимих значень.

Для вибору раціонального розташування тягових навантажень на ГДП по використанню енергії рекуперації в тяговій мережі слід розглянути ряд реально можливих варіантів графіків. Варіанти графіків розглядаються між суміжними ТП в межах періоду проходження розрахункового поїзда. Принцип підвищення ефективності використання енергії рекуперації в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень представлений на рис. 6.1.

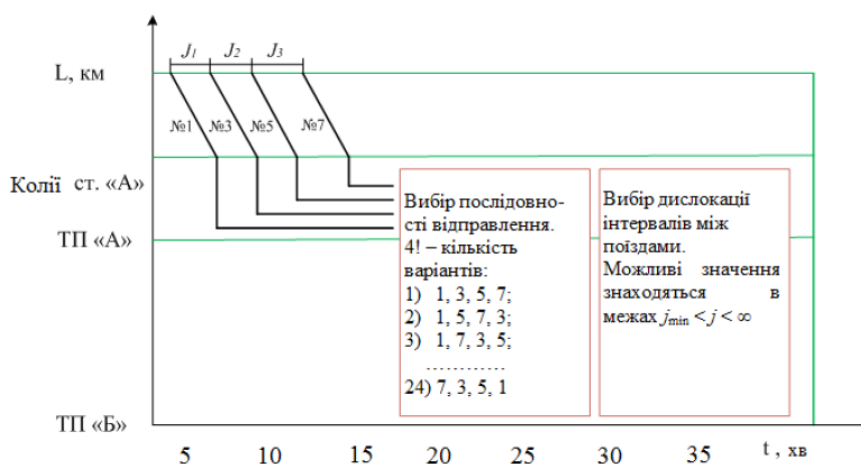


Рис. 6.1 – Принцип підвищення ефективності використання енергії рекуперації в тяговій мережі шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень

Одним з варіантів може бути вибір раціональних інтервалів між поїздами [12]. Для постановки даного завдання необхідно ввести позначення на ГДП в загальному вигляді (рис. 6.2).

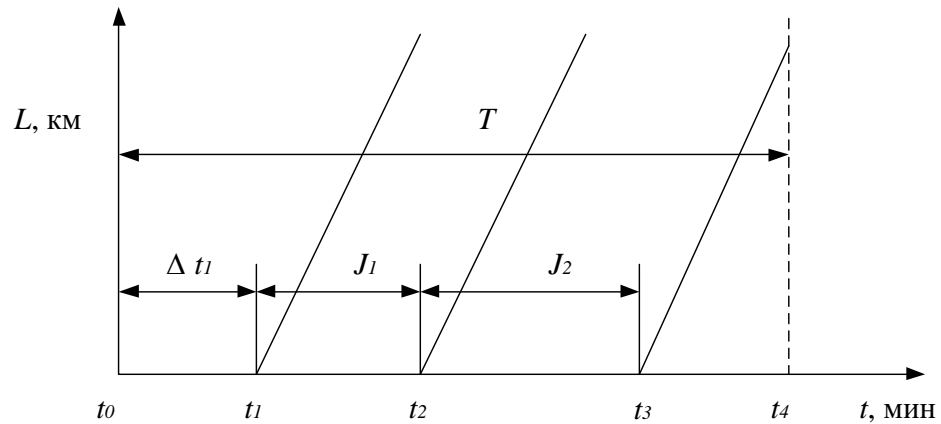


Рис. 6.2 – Розрахункова схема параметрів графіка руху поїздів

Час пропуску пакета  $T$  в загальному вигляді визначається виразом

$$T = \Delta t_1 + J_1 + J_2 + (t_4 - t_3), \quad (6.10)$$

де  $\Delta t_1$  – затримка часу відправлення першого поїзда в пакеті, хв;

$J_1, J_2$  – міжпоїздні інтервали, хв;

$(t_4 - t_3)$  – час ходу останнього поїзда в пакеті, хв.

З огляду на прийняте обмеження, отримуємо рівняння, що визначає незалежні параметри ГДП

$$\Delta t_1 + J_1 + J_2 = T - (t_4 - t_3) = \text{const}. \quad (6.11)$$

Для забезпечення адекватного режиму моделювання впливу параметрів транспортного потоку на ефективність використання енергії рекуперації поїздів необхідно підтримувати суму інтервалів між поїздами при їх різних комбінаціях постійної, що можливо лише на ділянках з значними розмірах руху.

## 6.2. Вибір типу та параметрів накопичувача енергії для тягових підстанцій. Керування процесом заряду накопичувачів енергії

### 6.2.1. Варіанти розташування накопичувачів для електричної тяги

СТЕ є одною з локальних підсистем зовнішньої (первинної) енергосистеми, що складається з електростанцій (ТЕС), ЛЕП, районні підстанцій РП, нетягових споживачів і т.д. Складність взаємодії режимів СТЕ і ПЕС, зокрема спотворення, що вносяться в первинну енергосистему різкозмінним тяговим навантаженням вимагає розглядати в загальному вигляді можливі місця розташування накопичувачів також за межами СТЕ, що показано на рис. 6.3.

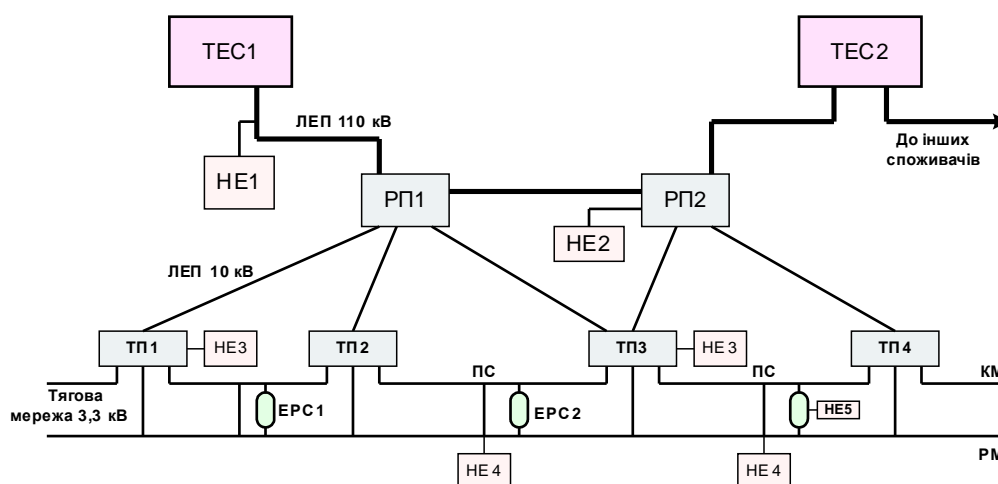


Рисунок 6.3 – Структурна схема живлення електрифікованої залізниці і можливі варіанти розташування НЕ в різних підсистемах

Те чи інше розташування НЕ в СТЕ визначає можливі функції і техніко-економічну ефективність їх використання. Так, наприклад, в системі первинного електропостачання (на електростанціях і районних підстанціях) більш ефективне використання гідроакumuлюючих електростанцій і надпровідних НЕ (НЕ1 і НЕ2 на рис. 6.3) енергоємністю понад 10 ГДж.

При використанні НЕ на ТП (НЕ3) для прийому надлишкової енергії рекуперації його енергоємність повинна складати 100...200 МДж. Така енергоємність прийнятна для інерційних і ємнісних НЕ. Енергоємність при установці НЕ

в тяговій мережі (HE4), на постах секціонування (ПС) повинна бути розрахована для прийому енергії рекуперації мінімум одного поїзда. У цьому випадку більш доцільно використовувати інерційних HE зниженою енергоємності і мнісних HE. При установці HE на борту електропоїздів може бути використаний тільки ємнісний HE або акумуляторна батарея. Головним пріоритетом у роботі ємнісного HE є прийом енергії рекуперації. Енергоємність його при цьому повинна складати до близько 12 МДж.

Але очевидним залишається факт, що якщо стабілізувати тягове навантаження в СТЕ, тобто поблизу місця спотворення, то поліпшуться і режими первинної енергосистеми, тобто виникне так званий системний ефект – зниження втрат енергії в СТЕ призведе до їх зниження на всіх вищих ланках енергосистеми. В такому разі проаналізуємо можливі варіанти розташування HE в СТЕ.

HE в СТЕ принципово може бути розташований в одному з трьох місць:

- безпосередньо на поїзді;
- на фідерах підстанції;
- приблизно в середині фідерної зони.

Найкращу якість згладжування виходить при накопичувачі на поїзді, але технічно бортовий накопичувач реалізувати складно.

Стаціонарний накопичувач не впливає на потоки енергії в тяговій мережі, але вирішує завдання згладжування для тягової підстанції ТП і первинної енергосистеми ПЕС, а також забезпечує можливість застосування рекуперативного гальмування на поїздах.

Є два варіанти установки стаціонарних накопичувачів: на фідерах ТП або в середині фідерної зони, тобто на посту секціонування. Для метрополітену, де підстанції, що живлять тягову мережу, жорстко прив'язані до станцій, тобто зупинним пунктів, поблизу яких реалізуються режими розгону і гальмування електропоїздів, накопичувач повинен бути встановлений на фідерах підстанції. В метрополітені його енергоємність зазвичай повинна дорівнювати подвоєному значенню енергії, що рекуперується при гальмуванні електропоїздом від розра-

хункової швидкості, причому подвоєння пояснюється можливістю одночасного гальмування двох поїздів, що прибувають на станцію з протилежних напрямків.

В умовах наземного залізничного транспорту, зокрема в системі приміських сполучень, розміщення тягових підстанцій не пов'язано з зупинними пунктами і, крім того, залежно від реалізованого графіка руху до фідерної зони ТП може знаходитися декілька одночасно гальмують поїздів. Тому тут завдання вибору ємності НЕ суттєво ускладнюється, і повинно вирішуватися методом статистичного моделювання.

### 6.2.2. Вплив місця установки накопичувача на енергетичні показники СТЕ

Розглянемо розв'язок задачі оптимального місця розташування НЕ в СТЕ метрополітену, як найбільш простий випадок.

Спрощена структурна схема СТЕ метрополітену зображена на рис. 6.11.

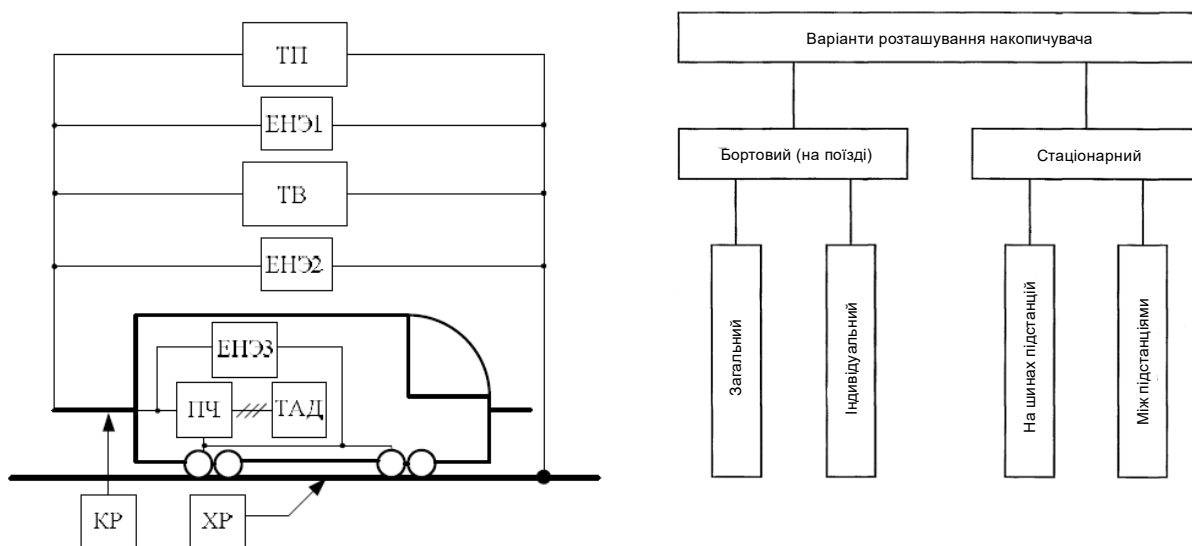


Рисунок 6.4 – Варіанти розташування НЕ в СТЕ

На даній схемі розглянемо можливі місця установки ємнісного НЕ:

- шини ТП;
- ділянка тягової мережі між ТП (ПСК або ППЗ);

– ЕРС метро.

На рис. 6.4 позначені наступні елементи: ТП – тягова підстанція, ТВ – тяговий випрямляч; ПЧ – перетворювач частоти; ТАД – тяговий асинхронний двигун, КР – контактна рейка, ХР – ходова рейка, ЕНЭ 1, 2, і 3 – ємнісні накопичувачі розташовані у відповідних місцях.

Виконаємо порівняльний аналіз ефективності застосування ЄНЕ в залежності від місця їх установки в СТЕ метрополітену.

При розміщенні ЄНЕ на шинах ТП останні стають приймачами енергії рекуперації, що накопичується в НЕ, а потім повертається назад у тягову мережу. У результаті знижується електроспоживання СТЕ з первинної живильної мережі, згладжуються піки навантаження ТП. Додатково зменшуються втрати в первинній мережі понижуючого і перетворювального трансформаторів. Також при даному розміщенні НЕ можна згладжувати хвилинні, часові та добові графіки енергоспоживання. Енергоємність НЕ при цьому повинна бути досить великою, оскільки вона зосереджена в одному місці. Економічний ефект при цьому буде складатися за рахунок економії:

- при згладжуванні піків струму;
- повернутої в тягову мережу рекуперації енергії;
- на більш дешевих тарифах при зменшенні величини встановленої потужності понижувальних і перетворювальних трансформаторів;
- при зменшенні капітальних витрат із-за установки менш потужних перетворювальних агрегатів, трансформаторів і ліній електропередачі.

При розміщенні на зупиночних пунктах загальна кількість і загальна встановлена потужність НЕ збільшуються, накопичення та повернення енергії рекуперації поїздів здійснюється поблизу зупиночних пунктів, практично минаючи тягову мережу, завдяки чому додатково економиться енергія втрат в тяговій мережі. Головна функція при даному розміщенні НЕ – це прийом надлишкової енергії рекуперації.

При розміщенні НЕ безпосередньо на тяговому ЕРС прийом рекуперації енергії відбувається безпосередньо у споживача, що з точки зору енергообміну



є позитивним моментом, оскільки втрати в тяговій мережі зводяться до мінімуму. Використання НЕ розташованого безпосередньо на ЕРС дозволяє найбільш повно вирішити проблему з прийомом енергії рекуперації. При роботі НЕ на рухомому складі частина пускового струму буде споживатися з самого поїзда, що дозволяє значно знизити втрати в тяговій мережі. Крім цього з'являється можливість аварійного виведення вагонів метрополітену з тунелю при повному чи частковому знятті напруги на шинах ТП, а також при виникненні аварійних режимів в контактній мережі.

Для оцінки процесів енергообміну в СТЕ метрополітену виконаємо теоретичні дослідження, аналізуючи різні місця установки НЕ. При цьому задаємося наступними умовами і вихідними величинами [135]:

1. напруга в тягову мережу подається від ТП;
2. ККД ТП  $\eta_{ТП} = 0,95$  ;
3. ККД тягової мережі  $\eta_{ТМ} = 0,93$  ;
4. ККД ЄНЕ  $\eta_{НЕ} = 0,98$  .

В тяговій мережі присутній споживач енергії з асинхронним електроприводом і можливістю рекуперації енергії гальмування з параметрами:

1. Маса поїзда метрополітену при максимальному завантаженні  $m = 264$  т;
2. Швидкість початку гальмування  $v = 60$  км/год;
3. ККД редуктора  $\eta_{ред} = 0,98$  ;
4. ККД тягового асинхронного двигуна  $\eta_{ТД} = 0,94$  ;
5. ККД тягового перетворювача  $\eta_{ТД} = 0,96$  ;
6. Середнє значення гальмівного зусилля  $F_{сп} = 265$  кН;
7. Середнє значення потужності на ободах коліс при гальмуванні  $P_{сп} = 2555$  кВт;
8. Коефіцієнт інерції обертових мас поїзда  $\gamma = 1,1$  .

На підставі наведених умов виконаємо розрахунок можливої кількості корисно використаної енергії рекуперації в різних місцях установки НЕ.

Кількість енергії, яке може повернути п'ятивагоний поїзд метрополітену при рекуперативному гальмуванні, обчислимо за виразом [1, 2]:

$$W_{\text{рек}} = \int_v^0 \frac{\gamma m v}{3600} dv = \frac{\gamma m v^2}{2 \cdot 3600} = 11,2 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (6.10)$$

Враховуючи ККД тягового обладнання, розрахуємо кількість енергії і потужність, яку може віддати поїзд в НЕ при гальмуванні:

- при установці НЕ на ТП

$$W_1 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТМ}} \eta_{\text{ТРР}}, \quad (6.11)$$

$$P_1 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТМ}} \eta_{\text{ТРР}}, \quad (6.12)$$

- при установці НЕ на перегонах між тяговими підстанціями

$$W_2 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТМ}}, \quad (6.13)$$

$$P_2 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТМ}}, \quad (6.14)$$

- при установці НЕ безпосередньо на тяговому рухомому складі

$$W_3 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}}, \quad (6.15)$$

$$P_3 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}}. \quad (6.16)$$

Слід зазначити, що при зміні профілю шляху в розрахунку необхідно додатково враховувати втрати тягової мережі, оскільки гальмування поїзда може відбуватися не тільки поблизу станції.

Кількість енергії і потужність, які можуть використовуватися іншим споживачем з урахуванням передачі і зберігання рекуперативної енергії у НЕ визначаються за виразами:

- при установці НЕ на ТП

$$W_4 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}}^2 \eta_{\text{ТАД}}^2 \eta_{\text{ТР}}^2 \eta_{\text{ТМ}}^2 \eta_{\text{ТРР}}^2 \eta_{\text{НЕ}}, \quad (6.17)$$

$$P_4 = P_{cp} \eta_{ред}^2 \eta_{ТАД}^2 \eta_{ТР}^2 \eta_{ТМ}^2 \eta_{ТРР}^2 \eta_{НЕ} , \quad (6.20)$$

- при установці НЕ на перегонах між ТП

$$W_5 = W_{рек} \eta_{ред}^2 \eta_{ТАД}^2 \eta_{ТР}^2 \eta_{ТМ}^2 \eta_{НЕ} , \quad (6.21)$$

$$P_5 = P_{cp} \eta_{ред}^2 \eta_{ТАД}^2 \eta_{ТР}^2 \eta_{ТМ}^2 \eta_{НЕ} , \quad (6.22)$$

- при установці НЕ безпосередньо на тяговому рухомому складі

$$W_6 = W_{рек} \eta_{ред}^2 \eta_{ТАД}^2 \eta_{ТР}^2 \eta_{НЕ} , \quad (6.23)$$

$$P_6 = P_{cp} \eta_{ред}^2 \eta_{ТАД}^2 \eta_{ТР}^2 \eta_{НЕ} . \quad (6.24)$$

В табл. 6.2 наведені результати розрахунків кількості енергії та потужності, яку може повернути п'ятивагонний поїзд в тягову мережу при гальмуванні з урахуванням різного місця установки НЕ.

Таблиця 6.2 – Порівняльний аналіз кількості енергії та потужності при рекуперативному гальмуванні

Місце встановлення НЕ	Кількість енергії, яке може повернути поїзд в НЕ, кВт·год	Потужність, кВт
НЕ1 (ТП)	8,93	2038
НЕ2 (ТВ)	9,4	2145
НЕ3 (ЕРС)	10,11	2307

Ефективність використання поїздом рекуперативної електроенергії визначаємо за виразами:

- при установці НЕ на ТП

$$\eta_4 = \frac{W_4}{W_{рек}} = \frac{P_4}{P_{cp}} , \quad (6.25)$$

- при установці НЕ на перегонах між ТП (зупиночних пунктах)

$$\eta_5 = \frac{W_5}{W_{рек}} = \frac{P_5}{P_{cp}}, \quad (6.18)$$

- при установці НЕ безпосередньо на тяговому рухомому складі

$$\eta_6 = \frac{W_6}{W_{рек}} = \frac{P_6}{P_{cp}}. \quad (6.19)$$

Результати порівняння кількості енергії та ефективності використання НЕ з урахуванням місця їх установки наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Порівняльний аналіз кількості енергії, потужності та ефективності з урахуванням передачі і зберігання рекуперативної енергії

Місце встановлення НЕ	Кількість енергії, що може використовуватися іншим споживачем, кВт·год	Потужність, кВт	Ефективність, %
ТП	6,98	1592	62,3
ТВ	7,94	1765	70,9
ЕРС	8,96	2044	80

Слід зазначити, що наведені розрахунки отримані при наявності одного споживача на ТП. В реальних умовах експлуатації при наявності декількох потягів метрополітену на перегоні, що працюють у режимі гальмування, ефективність прийому електроенергії НЕ при їх розміщенні на шинах ТП або на перегонах між ТП може значно знижуватися. Процес енергообміну може бути обмежений або навіть перерваний через накладення рекуперативних струмів і перевищення рівня напруги в тяговій мережі (975 В). При розміщенні НЕ на борту поїзда ефективність процесу енергообміну не буде залежати від кількості споживачів в тяговій мережі, оскільки циркуляція потужності буде відбуватися безпосередньо на рухомому складі.

Слід також зазначити, що аналіз місця установки НЕ проводився без урахування масогабаритних показників та їх впливу на динаміку розгону поїзда, що в даному випадку може взагалі виключати можливість такого розташування.

### 6.2.3. Принцип вибору типу та потужності накопичувача для СТЕ

Як вже зазначалося, основними цілями застосування НЕ в системах неавтономної електричної тяги є:

- поглинання надлишкової енергії рекуперації, тобто тієї частини енергії, що повертається поїздами в мережу і яка не може бути використана іншими поїздами, що працюють у тяговому режимі;
- згладжування піків споживання енергії з первинної енергосистеми шляхом підживлення тягової мережі від НЕ, якщо величина тягової навантаження перевищує деяке граничне значення.

Вибір типу НЕ енергії пов'язаний з багатьма обставинами, з яких найголовніші

- варіант розташування (стаціонарний/рухомої);
- загальна вартість накопичувача;
- вартість 1 кВт встановленої потужності;
- вартість 1 кВт·год (МДж) енергоємності (для 1 циклу роботи накопичувача);
- зовнішні габарити накопичувача і площа, займана установкою;
- маса НЕ, включаючи допоміжні пристрої;
- коефіцієнт корисної дії і інтенсивність саморозряду;
- прийнятних з технічної точки зору час зберігання енергії для 1 циклу роботи накопичувача;
- доступність вживаних в конструкції НЕ матеріалів і агрегатів;
- рівень технічного розвитку конструкції певного типу НЕ;
- ресурс роботи і надійність;
- вплив на навколишнє середовище, пожежонебезпека і вибухонебезпечність, наслідки аварії.

Суттєвість наведених вище чинників, залежить від конкретних обставин застосування НЕ та пов'язаних з ними обмежень.

Специфіка застосування НЕ в системі енергопостачання електричної тяги полягає в наступному:

1. У разі застосування бортового НЕ виходить найкраща якість згладжування піків енергії, але технічно бортовий НЕ реалізувати складно. Основні побажання пов'язані з його мінімальною масою, максимальною питомою енергією і потужністю, енергоємністю рівною енергії рекуперації, що генерується в режимі рекуперативного гальмування. НЕ повинен бути нечутливий до вібрацій і сили інерції, що виникають під час руху. Час зберігання енергії повинен становити порядку декількох десятків секунд – близько часу стоянки поїзда на зупинці. НЕ не повинен чинити негативного впливу на навколишнє середовище, виключено виникнення сильних зовнішніх електромагнітних полів, отруйних відходів. Наслідки виходу з ладу НЕ не повинні загрожувати людям, що знаходяться поблизу;
2. Застосування стаціонарних (нерухомих) НЕ в електричній тязі характеризується питомою енергією і питомою потужністю трохи менше, так як їх масогабаритні параметри вже не впливають на масу і розміри поїзда. Енергоємність накопичувача повинна забезпечити прийом енергії рекуперації від декількох поїздів, що знаходяться поблизу і вона пов'язана з відстанню між суміжними тяговими підстанціями і відстанню між місцями підключення накопичувачів до тягової мережі. Час зберігання енергії, так як раніше, не більше, ніж час стоянки одного поїзда на зупинці, тривалість інтервалу між черговими режимами заряду залежить від характеру руху поїздів на лінії. Вплив на навколишнє середовище в цьому випадку має менше значення, так як електромагнітні поля можна екранувати, а вплив шкідливих речовин можна мінімізувати застосуванням фільтрів і інших поглинаючих засобів, маса і об'єм яких грають другорядну роль.

З стаціонарних варіантів більш краща встановлення накопичувача в середині фідерної зони. При цьому як би з'являється додаткова підстанція, покращується рівень напруги в мережі, знижуються втрати енергії в тяговій мережі.

Проте технічно простіше поставити накопичувач безпосередньо на ТП, де для цього є приміщення. Крім того, в умовах метро стаціонарний накопичувач

доцільно розміщувати саме на фідерах підстанції, оскільки пуск-гальмування поїзда завжди здійснюються в зоні розміщення ТП.

Нижче наведено порівняння масо габаритних показників накопичувачів енергії чотирьох типів: електрохімічних, ємнісних, індуктивних і механічних (інерційних). Прийнято, що енергоємність накопичувача дорівнює 90 МДж (25 кВт·год), потужність заряду – розряду 2 МВт, напруга на затискачах установки дорівнює напрузі холостого ходу ТП метрополітену (825 В).

Використовуючи в накопичувачі енергії акумуляторні батареї треба з'єднати в серії близько 68 одиниць для отримання заданої напруги. Номінальна енергоємність 1 батареї (для часу розряду 10 год) за даними виробника (фірми «Hawker Energy»)  $42 \text{ А} \cdot \text{год} = 1,835 \text{ МДж} = 0,51 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Беручи струм батареї рівним 104,1 А (для часу розряду 15 хв) для заданої потужності накопичувача треба застосувати 24 паралельних гілки з 68 акумуляторами в серії. Енергоємність акумулятора відповідає току 104,1 А і дорівнює  $26 \text{ А} \cdot \text{ч}$  [6] і тому загальна енергоємність накопичувача  $1833 \text{ МДж} = 509 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ . Загальна маса акумуляторної батареї понад 26 т, загальний об'єм – близько  $19 \text{ м}^3$ . Для заданого рівня струмів розряду максимальна кількість циклів 80 % розряду дорівнює 350. ККД робочого циклу оцінюють на близько 70 %. Вартість накопичувача, враховуючи вартість системи управління - понад 100000 у.е.

У разі застосування ємнісного накопичувача перспективно застосування молекулярних конденсаторів, які характеризуються найбільш високими енергетичними показниками. Якщо прийняти конденсатор з номінальною напругою 28 В, ємністю 205 Ф, вагою 30 кг, з максимальним значенням накопиченої енергії рівним 80 кДж [8], то для забезпечення необхідного максимального допустимого рівня напруги для метрополітену 900 В треба сформувати секцію, з'єднуючи послідовно 32 конденсатора. Тоді ємність однієї секції буде дорівнює  $205/32 = 6,41 \text{ Ф}$ . Необхідна ємність батареї конденсаторів пов'язана з максимальним діапазоном змін напруги на його затискачах. Якщо прийняти, що цей діапазон відповідає допустимим змін напруги в тяговій мережі метрополітену,

тобто 675...900 В, то для прийнятої енергоємності установки, що дорівнює 90 МДж (25 кВт·год)

$$C_y = \frac{2W_y}{U_{mc \max}^2 - U_{mc \min}^2} = 508 \text{ Ф.}$$

Для створення конденсаторної батареї ємністю 508 Ф потрібно з'єднати паралельно 80 секцій. Тоді загальна кількість використаних конденсаторів буде рівно 2560 штук загальної маси 76,8 т і обсягу 41 м<sup>3</sup>. Приблизна ціна 1 конденсатора близько 160 у.е., тому вартість накопичувача з заданими параметрами можна приблизно оцінити в 420000 у.е.

Ємнісні накопичувачі енергії характеризуються найвищим значенням кількості робочих циклів – оцінюваним в 10<sup>8</sup>. Коефіцієнт повернення ЄНЕ залежить, насамперед, від ККД зарядно-розрядного пристрою і для відомих рішень він рівний 0,8...0,95.

Вся установка маховичного накопичувача енергії енергоємністю 90 МДж з допоміжними апаратами оцінюється в 25000 у.е. Вартість перетворювального агрегату потужністю 2 МВт становить близько 10000 у.е. За наведеними даними коефіцієнт повернення такого накопичувача можна оцінити в 92%, причому існують можливості його поліпшення шляхом усунення втрат, що виникають в підшипниках маховика, об'єднанням маховика з ротором мотор-генератора, застосуванням високоміцних композитних матеріалів для підвищення частоти обертання і зменшення ваги установки.

Порівняння описаних вище варіантів приводить до висновку, що кращими властивостями володіють маховичні накопичувачі енергії, які досить прості і дешеві, характеризуються прийнятними масо-габаритними параметрами. Застосування композитних матеріалів робить їх безпечними в експлуатації. Потужність прийому-віддачі енергії обмежує тільки потужність використаного мотор-генератора, ротор якого може одночасно виконувати функцію маховика, а обмотки статора можуть перебувати поза вакуумованої зони.

В системі електропостачання міського електричного транспорту, яка існує на сьогоднішній день є значна кількість недоліків, що призводить до втрат



електроенергії в ній. Тому створення та впровадження новітніх технологій заощадження енергії, в тому числі систем накопичення енергії є досить актуальною задачею.

#### **6.2.4. Принципи керування процесами енергообміну в накопичувачах**

Управління процесами енергообміну в НЕ для систем загальної енергетики та електричної тяги відрізняються. У загальній електроенергетиці НЕ повинен забезпечувати постійний рівень відбору електроенергії від генеруючої системи, компенсуючи відхилення від середнього значення потужності. Рівень енергоспоживання, при якому НЕ перемикається з зарядного режиму на розрядний і навпаки та величина його енергоемності встановлюються шляхом статистичного моделювання графіків навантажень з урахуванням заданого значення показника, що характеризує нерівномірність споживання потужності від джерела.

В системі електричної тяги, де наявним є як споживання так і рекуперація енергії, управління процесом енергообміну НЕ є більш складним і потребує застосування інших алгоритмів, які дозволяють ефективно узгоджувати роботу НЕ в режимі демпфера пікових навантажень та буфера надлишкової енергії рекуперації. По-перше, тут треба чітко розрізняти, коли має місце рекуперація з надлишком потужності, що віддається в порівнянні зі споживанням. Інший режим – це коли споживана потужність перевищує ту, що віддається. У першому випадку алгоритм управління НЕ простий – він повинен поглинати всю надлишкову енергію і його параметри мають бути обрані саме по цьому режиму. У другому випадку принцип управління енергообміном може варіюватися між двома крайніми випадками: реалізується алгоритм максимально швидкого розряду НЕ та віддачі накопиченої енергії з метою поглинання наступної порції енергії рекуперації або процес віддачі енергії регулюють за принципом підтримання певного рівня споживаної від енергосистеми значення потужності або мінімально допустимого рівня напруги на фідерах [296, 297].

Побудова системи керування стаціонарного НЕ визначається наявністю датчиків для реалізації зворотних зав'язків, що ви-мірюють для порівняння споживані потужності (струми) з тягової і зовнішньої мереж та датчиків напруги на шинах ТП та власне НЕ (рис. 6.5). Можливе регулювання тільки за сигналами датчика напруги на фідерах ТП, коли при підвищенні напруги вище рівня холостого ходу НЕ включатися в режим поглинання, стабілізуючи напругу на шинах в заданих межах [301].

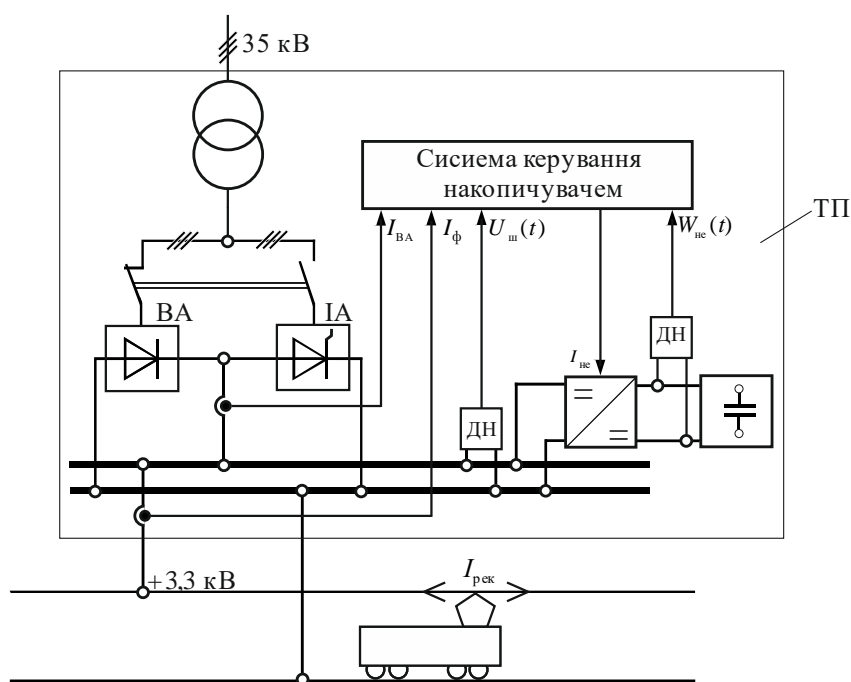


Рисунок 6.5 – Структурна схема керування режимом енергообміну НЕ

Цей алгоритм може бути вдосконалений застосуванням зворотних зав'язків за струмом фідерів і по струму (потужності) самого накопичувача (рис. 6.5).

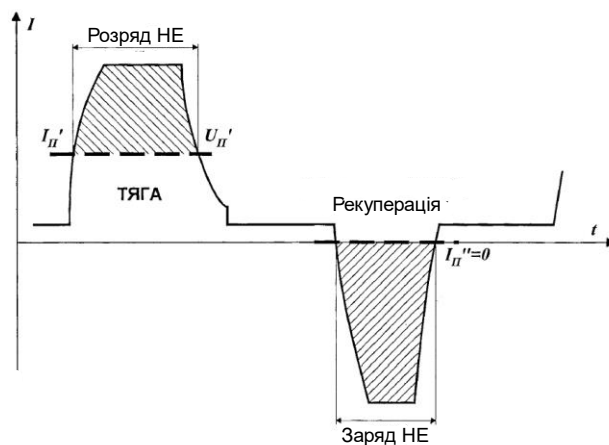


Рисунок 6.6 – Зв'язок режимів роботи накопичувача з режимами електроспоживання поїздів

При управлінні режимами роботи НЕ потрібно виконати два основних завдання: поглинання надлишкової енергії рекуперації і згладжування піків споживання можуть вирішуватися одночасно, тобто одним і тим же накопичувачем, але алгоритми управління будуть дещо різнитися, хоча загальний принцип включення накопичувача на поглинання або віддачу енергії залишається універсальним. При цьому на діаграмі «струм-час» за рис. 6.6 в якості значень струму перемикавання виділяються:

- деяке позитивне максимальне значення струму  $I_{II}'$  вище якого стаціонарне джерело живлення не може забезпечити тягове навантаження, так що при  $I > I_{II}'$  тягове навантаження повинно живитися від НЕ (заштрихована частина на рис. 6.16);
- нульове значення струму  $I_{II}'' = 0$ , так, що при  $I < 0$  накопичувач вмикається заряд.

Зазначений принцип управління для цілей практичного використання необхідно перетворити так, щоб включення накопичувача і перемикавання його режимів здійснювалося в функції напруги  $U$ . Ця ідея розглянута нижче стосовно до випадку, коли накопичувач встановлений на тяговій підстанції і підключений до її фідерів. На рис. 6.7 показана зовнішня характеристика підстанції, тобто залежність  $U_{\phi}(I_{\phi})$ . При цьому струмові  $I_{II}'$  відповідає напруга  $U_{II}'$  так що на-

копичувач може включатися на віддачу енергії (розряд) при  $U_\phi < U_{II}'$ . Включення накопичувача на заряд здійснюється при  $U_\phi > U_{II}''$ .

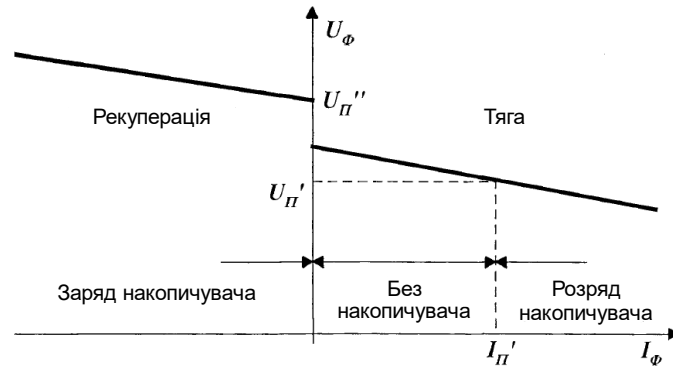


Рисунок 6.7 – Зовнішня характеристика ТП з приєднаним накопичувачем

Додатково в процесі заряду рекомендується контролювати напрям струму в фідері. Таким чином умову  $U_\phi > U_{II}''$  використано тільки для початкового включення накопичувача в режим заряду. Далі перевіряється умова  $I_\phi = 0$  і  $I_{рек} > 0$ , так що заряд триває тільки при виконанні цієї умови. Заряд припиняється при  $I_\phi > 0$  або при  $I_{рек} < 0$  (рис. 6.8).

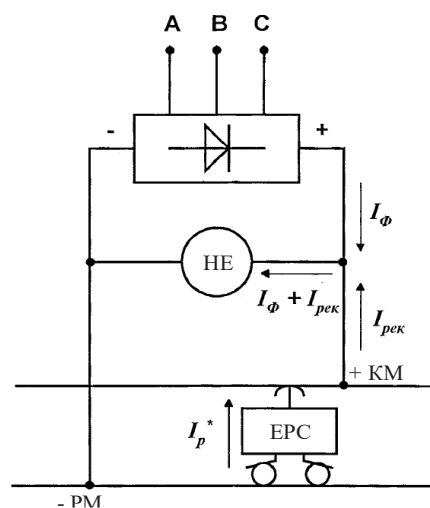


Рисунок 6.8 – Струми тягової підстанції, обладнаної накопичувачем

Ефективність тієї або іншої стратегії управління визначається шляхом моделювання, причому цей процес може поєднуватися з процесом управління, для чого в системі управління накопичувачем повинно бути передбачено мікропроцесорний пристрій, а відповідна система повинна реалізувати принцип самонавчання та адаптації. Ця задача перетворюється таким чином в класичну задачу загальної теорії управління, вирішуване в умовах невизначеності з поступовим накопиченням інформації про об'єкт управління.

В СТЕ критерієм якості роботи НЕ повинно бути виконання наступних умов:

- накопичувач поглинає всю надлишкову енергію рекуперації;
- накопичувач забезпечує обмеження споживаного струму на рівні  $I'_{\Pi}$  (рис. 6.8).

Якщо графік руху поїздів вважати фіксованим (незалежно від того, є в системі накопичувач або ні), то виконання зазначених умов визначається вибором наступних параметрів:

- енергоємність накопичувача  $E_{HE}$ ;
- рівень струму  $I'_{\Pi}$ .

Мінімальна енергоємність накопичувача відповідає максимальному інтегралу від рекуперативного струму

$$E_{HE \min} = \int_{t_1}^{t_2} U I_{\text{рек}}(t) dt.$$

Шляхом статистичного моделювання можна знайти таке значення  $I'_{\Pi}$ , при якому будь-яке перевищення споживаного струму над значенням  $I'_{\Pi}$  було компенсовано накопичувачем. Якщо значення  $I'_{\Pi}$  виходить занадто великим, то для його обмеження потрібно збільшити енергоємність накопичувача  $E_{HE}$ .

Дане рішення задачі відповідає оптимальної енергоємності  $E_{HE \text{ opt}}$ . Якщо її зменшити, то з'являється надлишкова енергія рекуперації та (або) некомпенсовані накопичувачем піки споживання  $I > I'_{\Pi}$ .

### 6.3. Ситуаційне регулювання напруги на шинах тягових підстанцій і в тяговій мережі при рекуперації електроенергії

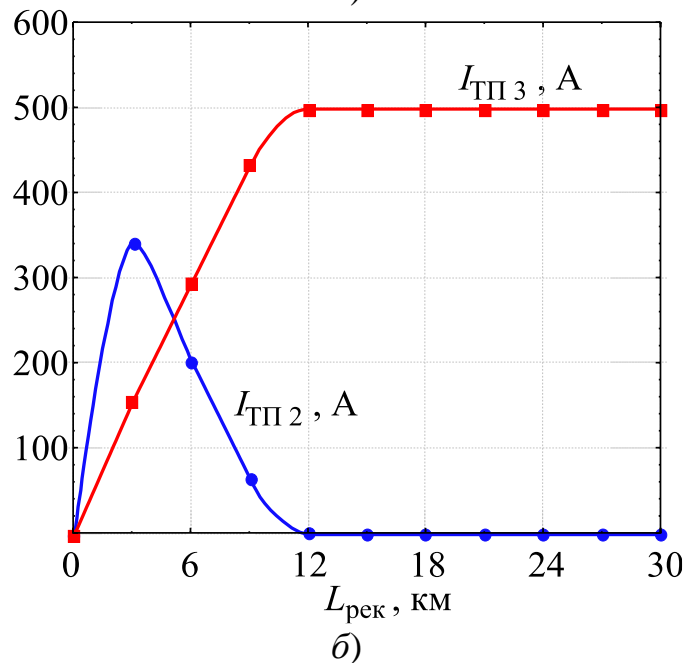
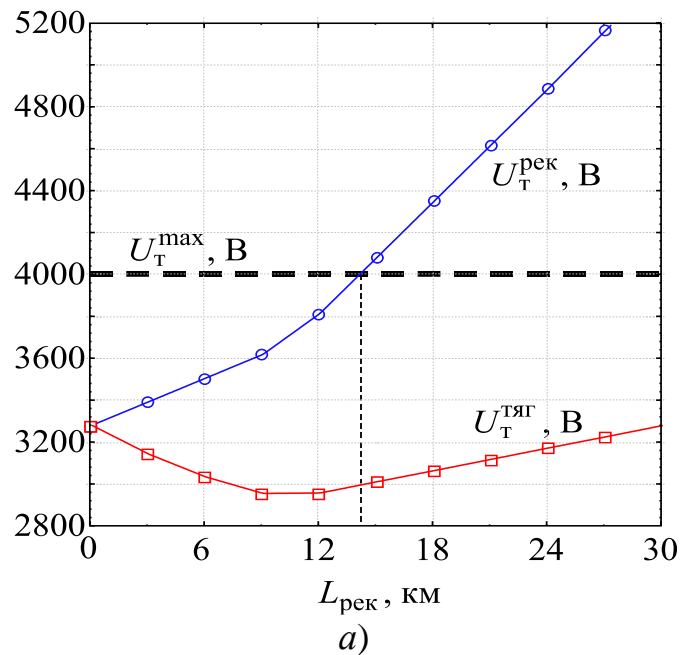
У разі зниження інтенсивності руху поїздів та збільшення міжпоїзного інтервалу зростає та складова рекуперованої електроенергії, яка перетікає через шини тягових підстанцій до поїздів, що перебувають у режимі тяги на сусідніх міжпідстанційних зонах. При цьому особливу роль для перетоків енергії рекуперації з одного міжпідстанційних зони на інші відіграє рівень напруги на шинах тягових підстанцій, через які здійснюється перетікання даної енергії. Таким чином, на ділянках постійного струму, де відсутні приймачі надлишкової енергії рекуперації, одним із заходів, спрямованих на підвищення стійкості характеру рекуперативного гальмування, може бути відповідне регулювання напруги холостого ходу на тягових підстанціях, через шини яких можна очікувати значне перетікання потужності рекуперації.

Система керованого електропостачання на основі автоматичного регулювання напруги тягових підстанцій постійного струму може бути реалізована на діючих підстанціях електрифікованих ділянок підключенням до нерегульованих перетворювачів регульованих перетворювачів вольтододаткових пристроїв і на нових напрямках, що електрифікуються – установкою на підстанціях регульованих перетворювачів.

Для регулювання напруги в контактній мережі для ефективного рекуперативного гальмування необхідна зміна напруги безпосередньо в контактній мережі за допомогою пристроїв регулювання напруги тягових підстанцій. При цьому має забезпечуватися на одній або декількох фідерних зонах безперервне і одночасне для всіх фідерних зон регулювання напруги в контактній мережі

На рис. 6.9, як приклад, наведено отримані розрахунковим шляхом залежності напруги на струмоприймачі поїздів в тяговому і рекуперативному режимах (при струмах  $I_{рек} = 1000$  А і  $I_{тяг} = 1500$  А), струмів тягових підстанцій ТП 2 і ТП 3 і відносних втрат потужності в тяговій мережі від віддалення поїздів для двоколіїної ділянки, одержані шляхом багатоваріантних розрахунків

схеми рис. 3.9, б при різних значеннях  $(x_1, x_2)$  [207, 298]. Для спрощення прийнято, що поїзди ЕРС 1 і ЕРС 2 рухаються на суміжних фідерних зонах з однаковою швидкістю в напрямку ТП 1 і ТП 3 відповідно, тому в будь-який момент часу  $x_1 = x_2$ . Ділянка прийнята з двостороннім роздільним живленням, тягові підстанції мають однакові зовнішні характеристики з напругою холостого ходу  $E_{ТП} = 3300$  В, що виключає протікання зрівняльних струмів в тяговій мережі.



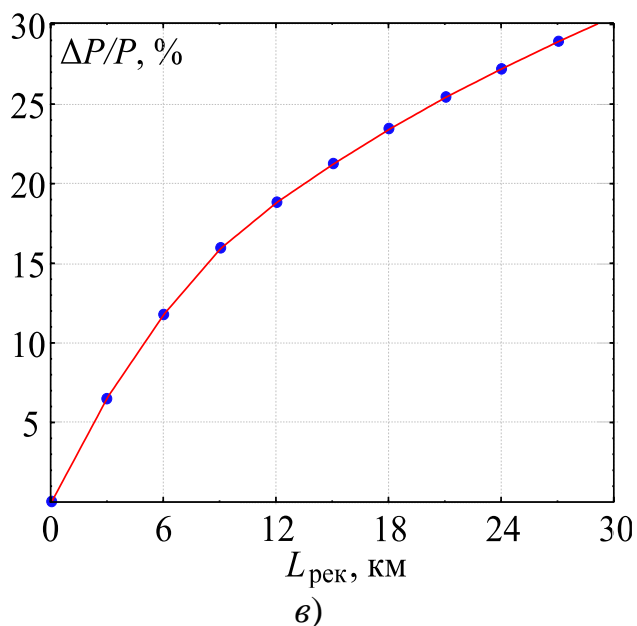


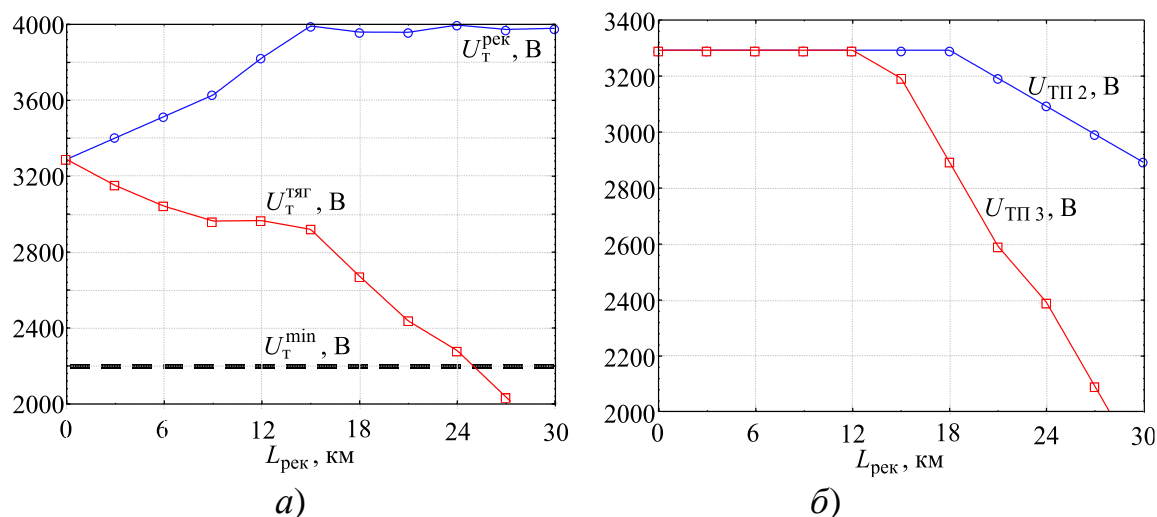
Рисунок 6.9 – Залежність напруги на струмоприймачах поїздів (а), струму тягових підстанцій (б) і відносних втрат потужності в тяговій мережі (в) від видалення поїздів в тяговому і рекуперативному режимах

З рис. 6.9, а видно, що при такому співвідношенні струмів тяги і рекуперації на суміжних фідерних зонах можливість здійснення рекуперації за умовами напруги на струмоприймачі (1.8) визначається відстанню між поїздами  $L_{рек} \leq 14$  км. Крім цього, з рис. 6.9, б видно, що навіть за умови рівності зовнішніх характеристик тягових підстанцій режим рекуперації призводить до утворення в системі тягового електропостачання зрівняльних струмів, що проявляється в непропорційному завантаженню суміжних тягових підстанцій залежно віддаленню поїзда. Розрахунками встановлено, що плавне регулювання напруги на шинах тягових підстанцій з метою вирівнювання їх навантажень при наявності на ділянці рекуперації призведе лише до збільшення втрат потужності в тяговій мережі. Необхідно також зазначити, що при даному розташуванні поїздів і співвідношенні їх струмів тягова підстанція ТП 1 працює в режимі холостого ходу (при відсутності тягової навантаження зліва), тому не впливає на струморозподіл в системі електропостачання.



В такому випадку для підвищення ефективності використання енергії рекуперації в умовах обмеженого тягового електроживлення на ділянці при фіксованих значеннях ( $I_{\text{рек}} > I_{\text{тяг}}$ ), може бути використана залежність  $L_{\text{рек}} = L_{\text{рек}}(U_{\text{ТП 1, 2}}^{\text{XX}}$ ), згідно з якою для розширення зони рекуперації та забезпечення перетікання надлишкової енергії  $W_{\text{рек надл}}$  до віддалених поїздів в тяговому режимі необхідно плавно знижувати напругу на шинах тягових підстанцій. Для забезпечення режиму рекуперації за умовами допустимого рівня напруги на струмоприймачі поїзда необхідно знизити напруги холостого ходу на шинах тієї з тягових підстанцій (або обох), яка більше живить поїзд в режимі тяги, тобто як би перекласти більше навантаження на рекуперуючий поїзд. Межею регулювання при цьому повинна виступати обмеження по мінімально допустимому рівню напруги на струмоприймачах поїздів в тягових режимах згідно ГОСТ и ЕН, що забезпечує умову  $U_{\text{т}}(t) \geq U_{\text{т}}^{\text{min}}$ .

На рис. 6.10 наведено закони зміни напруги на шинах тягових підстанцій ТП 2 і ТП 3, що забезпечує дотримання умови (1.8).



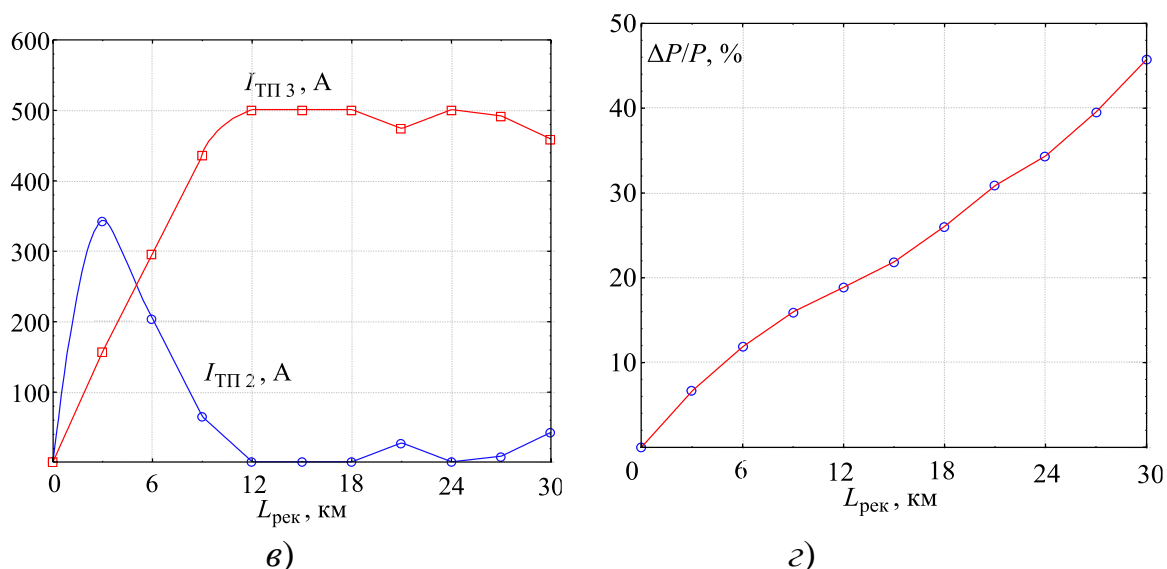


Рисунок 6.10 – Залежність напруги на струмоприймачах поїздів (а) і на шинах тягових підстанцій (б), струму тягових підстанцій (в) і відносних втрат потужності в тяговій мережі (г) від видалення поїздів при регулюванні напруги підстанцій

Як видно з рис. 6.10, а регулювання напруги на шинах тягових підстанцій теоретично дозволяє розширити зону рекуперації до 24 км, а далі обмежено умовою нижньою границею (1.8), що крім того, супроводжується збільшенням втрат енергії в тяговій мережі (рис. 6.10, г)

В реальності отримання напруги на струмоприймачі поїзда ЕРС 2 близького до мінімального рівня на ділянках зі складним профілем призведе до збільшення споживаного струму і, як наслідок, ще більшого зниження напруги на струмоприймачі, що особливо характерно для сучасного електрорухомого складу з плавним регулюванням потужності в режимі руху з постійною швидкістю (силою тяги). При цьому може погіршитися пропускна здатність ділянки і ще більше зростуть втрати в тяговій мережі (рис. 6.10, г), що істотно позначиться на ефективності електричної тяги в цілому.

Таким чином за даним підходом для кожної конкретної ділянки може визначитися своя межа раціонального регулювання напруги, що забезпечує прийнятний баланс між втратами енергії в тяговій мережі і втратою потенційно можливої рекуперації енергії поїзда.

#### 6.4. Розробка технології сумісної роботи інверторів та накопичувачів при розподілі надлишкової енергії рекуперації

Для розподілу надлишкової енергії рекуперації за всіма можливими каналами необхідно вимірювати напругу на шинах постійного струму тягової підстанції. При цьому необхідно додатково вимірювати напругу на стороні змінного струму і рівень заряду накопичувача, після чого на основі їх нечіткого порівняння обчислювати значення складових надлишкового струму рекуперації, якими є вхідний струм інвертора і зарядно-розрядного пристрою накопичувача та регулювати ці величини таким чином, щоб напруга на шинах постійного струму не перевищувала напругу холостого ходу, що забезпечує стійкий процес рекуперації транспортного засобу. Данна система представлена на рис. 6.11.

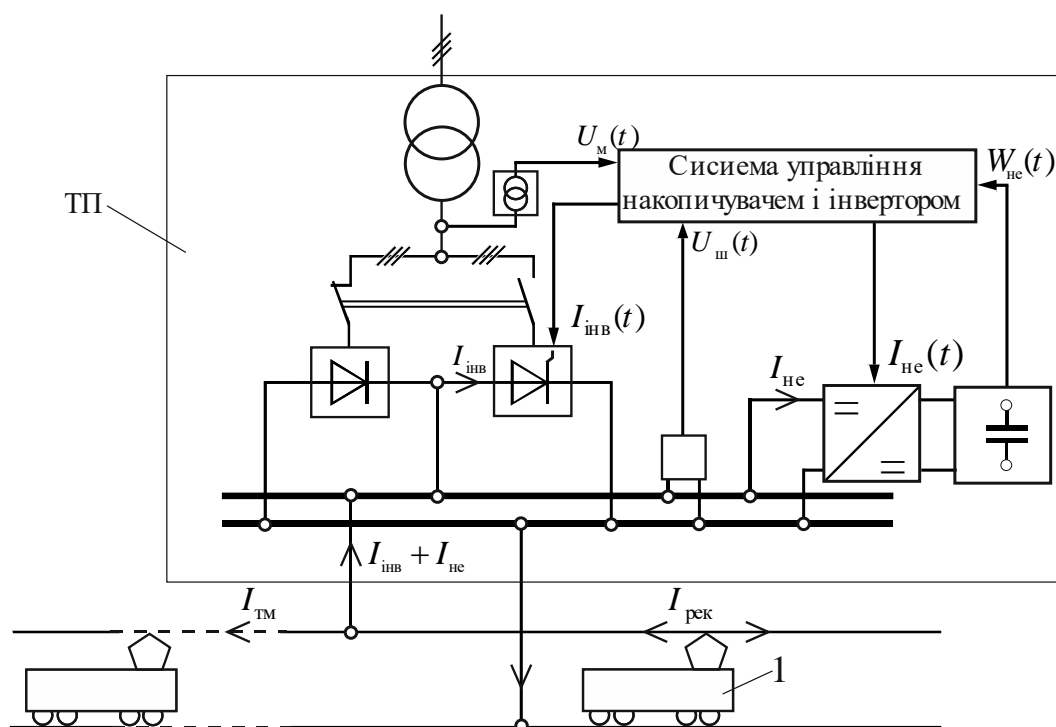


Рисунок 6.11 – Принципова схема управління процесом розподілу енергії рекуперації шляхом узгодженої роботи накопичувачів і інверторних перетворювачів

Метод розподілу оснований на нечіткому виводі про розподіл і дозволяє реалізовувати режим стабілізації вихідної потужності інвертора шляхом регу-

лювання зарядно-розрядного режиму накопичувача. Метод розподілу побудовано на алгоритмі з паралельними процесами, представленою на рис. 6.12.

Робота алгоритму наступна. До системи управління поступають вхідні контрольовані величини: напруга відповідно на шинах постійного струму тягової підстанції  $U_{\text{ш}}(t)$  і зовнішньої мережі  $U_{\text{м}}(t)$  та рівень заряду накопичувача  $W_{\text{не}}(t)$ . Вихідними є сигнали на управління величинами вхідних струмів інвертора  $I_{\text{інв}}(t)$  та зарядно-розрядного пристрою накопичувача  $I_{\text{не}}(t)$ . Напруга  $U_{\text{ш}}(t)$  вимірюється з частотою не менше 10 Гц.

При її зростанні над номінальним рівнем напруги холостого ходу  $U_{\text{шхх}}$  на 5 % фіксується режим рекуперативного гальмування на ділянці. Для уточнення режиму і виключення зростання  $U_{\text{ш}}(t)$  від комутаційних стрибків виконується подальше вимірювання протягом наступних 0,3 с з частотою не менше 100 Гц. Якщо  $U_{\text{ш}}(t)$  продовжує зростати та сягає значення  $1,1 \cdot U_{\text{шхх}}$  ідентифікується режим надлишкової рекуперації енергії на ділянці. Після цього тягова підстанція перемикається з випрямного режиму на інверторний, вмикається зарядно-розрядний пристрій накопичувача і виконується нечітке порівняння  $U_{\text{м}}(t)$  і  $W_{\text{не}}(t)$  за системою нечітких правил (табл. 6.4) на основі чого регулюються значення струмів  $I_{\text{інв}}$  та  $I_{\text{не}}$  таким чином, щоб  $U_{\text{ш}}(t)$  знизити до значення  $U_{\text{шхх}}$ . Складова надлишкового струму рекуперації, що перетікає по тяговій мережі до віддалених навантажень безпосередньо не регулюється і встановлюється природнім струморозподілом за залишковим принципом  $I_{\text{тм}} = I_{\text{рек}} - I_{\text{інв}} - I_{\text{не}}$ , оскільки має місце у випадку коли прийом енергії зовнішньою мережею та накопичувачем обмежено відповідно максимально допустимою напругою на виході інвертора та повним зарядом накопичувача. При цьому система управління реалізує оптимальний розподіл надлишкового струму рекуперації  $I_{\text{рек}}$  в допустимих межах, враховуючи ККД пристроїв розподілу та передачу в зовнішню мережу стабілізованої потужності [300].

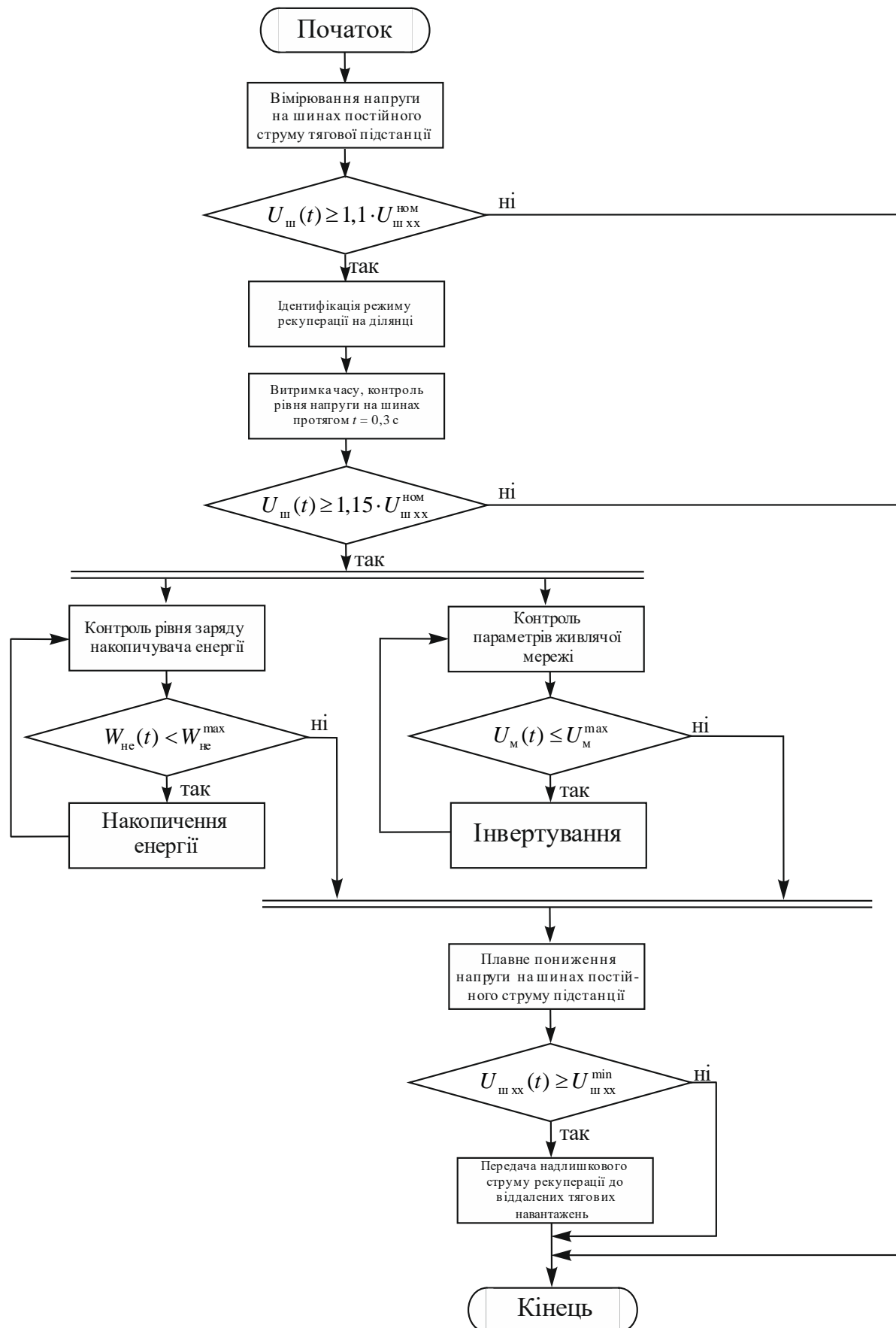


Рисунок 6.12 – Алгоритм роботи системи сумісного управління накопичувачем і інвертором в системі тягового електропостачання

Таблиця 6.4 – Система нечітких правил прийняття рішень про розподіл

Рівень вхідних величин в допустимих межах, що порівнюються		Рівень вихідних величин, що регулюються в допустимих межах	
$W_{не}(t)$	$U_M(t)$	$I_{не}(t)$	$I_{інв}(t)$
низький	низький	високий	високий
середньо низький	середньо низький	середньо високий	середньо високий
середній	середній	середній	середній
середньо високий	середньо високий	середньо низький	середньо низький
високий	високий	низький	низький

За даним алгоритмом розроблено спеціалізований програмний засіб [293], що описано в Додатку Б.

### 6.5. Техніко-економічна оцінка впровадження енергозберігаючих заходів з підвищення ефективності споживання енергії рекуперації

Розглянемо економічну доцільність впровадження розроблених заходів на прикладі використання накопичувачів енергії для СТЕ. Якщо досвід експлуатації випрямно-інверторних перетворювачів в системах електрифікованого транспорту України існує достатній, то досвіду використання сислових накопичувачів зараз ще немає, внаслідок їх високої вартості, а їх використання в перспективі очікується при зниженні вартості і збільшенні питомої енергоємності. Якщо прийняти коефіцієнт рекуперації на рівні 21...25 %, то при відомих річних енерговитратах на тягу електропоїздів та вартості потрібного енергозберігаючого обладнання можливо оцінити його техніко-економічну ефективність.

Основним показником економічної доцільності впровадження енергозберігаючих заходів є річний економічний ефект – величина, яка включає в себе прибуток від використання енергозберігаючого обладнання за виключенням витрат на капітальний ремонт та річну амортизацію:

$$C = \Delta C_{еє} - (C_a + C_p)K, \quad (6.28)$$

де  $\Delta C$  – річний прибуток від використання інверторів (накопичувачів), що є вартістю зекономленої електроенергії, грн.;

$C_a$  – річні амортизаційні витрати;

$C_p$  – річні витрати на експлуатаційне обслуговування та ремонт;

$K$  – початкові одноразові капіталовкладення, грн, що включають повну вартість обладнання з урахуванням виконаних робіт.

Вартість зекономленої електроенергії при впровадженні накопичувачів на ТП оцінюється за виразом

$$\Delta C_{ee} = 365(W_{рек1}T_1N_1 + W_{рек2}T_2N_2 + \dots + W_{рекn}T_nN_n)C_{ee}, \quad (6.29)$$

де 365 – кількість днів у році,

$W_{рекn}$  – середня енергія рекуперації від одного поїзду згідно з виразом (1.3),

$N_1, N_2, \dots, N_n$  – число пар поїздів,

$T_1, T_2, \dots, T_n$  – тривалість періодів графіка руху поїздів з різними розмірами руху,

$C_{ee}$  – тарифна ставка на електроенергію (0,81 грн/кВт·год).

Термін окупності визначається за виразом

$$T_{ок} = K/C. \quad (6.30)$$

В якості показника для розрахунку ефективності енергозберігаючого заходу в даний час використовується чистий дисконтований дохід (ЧДД) – накопичений дисконтований ефект за розрахунковий період, наведений до початкового кроку по нормі дисконту, що визначається за формулою:

$$ЧДД = \sum_{t=0}^T (P_t - Z_t) \alpha_t, \quad (6.31)$$

де  $P_t$  – приплив грошей в році  $t$ ,

$Z_t$  – відтік грошей в році  $t$  без урахування амортизаційних відрахувань, але з урахуванням інвестицій,

$\alpha_t$  – коефіцієнт приведення.

Впровадження накопичувача в системі електротранспорту буде вважатися ефективним в разі, якщо розрахункове значення чистого дисконтованого доходу буде більше нуля. При порівнянні двох і більше проектів між собою перевага повинна віддаватися проекту з великим значенням ЧДД (позитивний за розра-

хунковий період).

У зв'язку з тим, що вартість готового накопичувача електричної енергії для метрополітену є величиною невідомою, проведемо розрахунок граничної вартості накопичувача при його заданих параметрах і одержуваному ефекті, а також заданому терміні окупності.

Згідно з рекомендаціями в [24] гранична вартість накопичувача встановлених параметрів, при яких він буде окупатися в заданий термін визначається за виразом

$$C_{H \max} = \frac{K(\Delta C_{ee} + C_{IIIС} - C_e - C_p)}{1 - \frac{K}{L}}, \quad (6.32)$$

де  $C_{IIIС}$  – величина дохідних надходжень при реалізації потенціалу підвищення пропускної спроможності,;

$C_e$  – витрати з операційної діяльності, пов'язані з освоєнням додаткового обсягу перевезень,

$L$  – термін служби накопичувача.

Підвищення пропускної спроможності ділянки при установці одного накопичувача електричної енергії можливо тільки при його розміщенні в межах перегону що є лімітуючим, що може дати близько 3% приросту пар поїздів для ділянки. У разі відсутності лімітуючих ділянок підвищення пропускної здатності можливо тільки при установці групи накопичувачів енергії на ділянці, що несе за собою додаткові витрати.

В якості прикладу виконаємо розрахунок максимальної вартості НЕ при наступних вихідних даних (табл. 6.5).

В результаті розрахунку визначено, що при відсутності ефекту від підвищення пропускної здатності ділянки, максимальна вартість накопичувача при заданих вихідних даних (таблиця 5.7) складе  $C_{H \max} = 15$  млн грн. У разі установки накопичувача енергії на лімітуючим ділянці і підвищення пропускної спроможності на одну пару поїздів максимальна вартість накопичувача електричної енергії складе  $C_{H \max} = 19$  млн грн.



Таблиця 6.5 – Вихідні дані для розрахунку

Експлуатаційні витрати; тис. грн.	1,14
Вартість зекономленої електроенергії; тис. грн/рік	26587
Доходних надходжень при реалізації потенціалу підвищення пропускної спроможності на одну пару поїздів; тис. грн./рік	428569
Витрати з операційної діяльності, пов'язані з освоєнням додаткового обсягу перевезень; тис. грн./рік	98563
Будівельно-монтажні та пусконаладжувальні роботи; тис. грн.	51,2
Строк служби НЕ; років	30
Термін окупності проекту; років	10
Дохідна ставка; грн./10 ткм	450
Рентабельність перевезень; %	35
Ставка дисконтування ( $E$ )	0,1

Аналогічні розрахунки можна провести для виконання орієнтовних техніко-економічних розрахунків при впровадженні інверторних перетворювачів та регуляторів напруги на шинах ТП. В даних розрахунок не включена система управління силовими пристроями та програмне забезпечення, оскільки їх вартість знаходиться в межах до 1 % від вартості силових пристроїв.

### Висновки до розділу 6

1. Запропоновано принцип підвищення ефективності споживання енергії рекуперації в системі тягового електропостачання за рахунок вибору оптимальної послідовності відправлення поїздів шляхом вибору раціональної послідовності відправлення поїздів різних категорій з можливих варіантів для реалізації мінімуму втрат енергії рекуперації.

2. Застосування бортового НЕ має місце найкраща якість згладжування піків енергії, але технічно бортовий НЕ реалізувати більш складно, що пов'язано із мінімізацією його маси, максимальною питомою енергією і потужністю, енергоємністю рівною енергії рекуперації, що генерується в режимі рекуперативного гальмування.

3. Аналіз існуючих типів накопичувачів дозволив віддати перевагу у використанні для потреб тягового електропостачання ємнісних, надпровідних індуктивних та інерційних накопичувачів, оскільки їх електромагнітні і електромеханічні характеристики найбільш сумісні з системою тягового електропостачання. На даному етапі за енергетичним і масогабаритним критеріями не може бути повністю розв'язане питання що до оптимального місця розташування накопичувача, чи то стаціонарне (на ТП), або портативне (на ЕРС).

4. Залишається невирішеним питання оптимального керування процесом енергообміну накопичувача, оскільки режими електроспоживання і рекуперації в системі електричної тяги володіють високим ступенем випадковості, тобто вирішення цієї задачі вимагає врахування багатьох невизначених факторів.

5. Підвищення ефективності використання енергії рекуперації в умовах обмеженого тягового електроспоживання на ділянці може бути реалізовано шляхом розширення зони рекуперації та забезпечення перетікання надлишкової енергії  $W_{\text{рек надл}}$  до віддалених поїздів в тяговому режимі. Для забезпечення режиму рекуперації за умовами допустимого рівня напруги на струмоприймачі поїзда необхідно плавно знижувати напругу холостого ходу на шинах тієї з тягових підстанцій (або обох), яка більше живить поїзд в режимі тяги.

**Матеріали розділу опубліковано в [293-301].**

## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі на основі викладених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена актуальна науково-прикладна проблема підвищення ефективності використання енергії рекуперації електрифікованого транспорту шляхом її оптимального розподілу в системах тягового та зовнішнього електропостачання за рахунок управління накопичувачами, інверторами та регуляторами напруги на шинах ТП. Розроблені теоретичні положення також дозволяють мінімізувати встановлену потужність потрібного енергозберігаючого обладнання та виконувати техніко-економічну оцінку енергозберігаючих заходів. Основні наукові результати, висновки та практичні рекомендації полягають в наступному:

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, ін-

- вертори) 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  $k_\phi$  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 результаті 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 ефек-

тивності 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 мет-

рополітену, 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 %.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги / Г. К. Гетьман. – Днепропетровск : Изд-во Маковецкий, 2011. – 456 с.
2. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров. – Москва : Транспорт, 1995. – 328 с.
3. Сулим А. А. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена / А. А. Сулим, С. Д. Сичев, В. Р. Распопин // «Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации» : материалы X международной научно-техн. конф. – Кременчуг, 2012. – С. 344.
4. Щуров Н. И. Методы и средства экономии и повышения эффективности использования энергии в системе городского электрического транспорта. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Новосибирск. 2003. 43 с.
5. Колодкин О. В. Системы рекуперативного торможения электровозов постоянного тока в условиях ограниченного потребления возвращаемой электроэнергии. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. Санкт-Петербург. 2002. 21 с.
6. Семенов И. В. Повышение эффективности систем рекуперативного торможения электропоездов постоянного тока пригородного сообщения. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. Москва. 2003. 20 с.
7. Петренко О. М. Визначення ефективності електрорухомого складу. Основні положення та підходи / О. М. Петренко, Б. Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2015. – № 6. – С. 51-59.
8. Павелчик М. Повышение эффективности электрической тяги при помощи накопителей энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Москва. 2000. 48 с.

9. Щербак Я. В. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. - №2. – С. 30-34.
10. Сергієнко, М. І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати / М. І. Сергієнко // Локомотив-інформ. – 2010. - №4. – С. 24-26.
11. Сопов В. И. Способы повышения использования энергии электрического торможения подвижного состава [Электронный ресурс] / В. И. Сопов, Н. А. Курнаева, А. В. Иванов. – Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии. – 2012. – Режим доступа: <http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43>.
12. Аннин В. А. Рекуперация электроэнергии – основное направление энергосбережения / В. А. Аннин // Локомотив. – 2012. – № 5. – с.12–15.
13. Бакланов А. А. Возврат электроэнергии и динамика поезда / А. А. Бакланов // Локомотив. – 2011. – № 5. – С.34-35.
14. Калинин В. К. Электровозы и электропоезда / В. К. Калинин. – Москва : Транспорт, 1991. – 480 с.
15. ГОСТ 6962-75 – Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений // Утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 14.11.1975, № 3137. – Москва : Изд-во стандартов, 1976. – 3 с.
16. Стандарт NF EN 50163-1996. МКС 29.280 – Напряжение питания тяговых железнодорожных сетей // Утвержден европейским комитетом по стандартизации электротехники. Действует с 01.11.1996. – 11 с.
17. Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. С. Вильгельм и др. // Локомотив. – 2013. – № 8. – С. 5-9.
18. Рекуперация повышает энергетическую эффективность дорог / А. В. Котельников, А. Я. Коган и др. // Локомотив. – 2008. – № 4. – С. 20-22.



19. Незевак В. Л. Влияние параметров системы тягового электроснабжения постоянного тока на эффективность использования энергии рекуперации / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин, К. П. Стищенко // Материалы международной научно-практической конференции. – Омск. – 2014. – С. 228-238.
20. Тарута П. В. Повышение эффективности использования энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения постоянного тока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н. Омск. 2004. 18 с.
21. Нерубацький В. П. Удосконалення процесу рекуперації енергії в системі тягового електропостачання залізниць постійного струму / В. П. Нерубацький // Октябрь. – 2013. – №. 2012 – С. 13-19.
22. Фукс Н.Л. Оптимизация приема энергии рекуперации / Н. Л. Фукс // Железнодорожный транспорт. – 1983. – № 3. – С. 21-26.
23. Незевак В. Л. Об оценке влияния межпоездного интервала на энергоэффективность перевозок в условиях применения рекуперативного торможения / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин, А. С. Вильгельм // Межвуз. темат. сб. науч. тр. – Омск. – 2015. С.55-63.
24. Вильгельм А. С. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на железных дорогах постоянного тока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Омск. 2013. 20 с.
25. Вильгельм А. С. Принципы построения энергетических диаграмм для оценки эффективности применения рекуперативного торможения / А. С. Вильгельм, А. Л. Каштанов, М. М. Никифоров // Известия Транссиба. – 2012. - № 2 (10). – С. 63-68.
26. Вильгельм А. С. Оценка потенциала энергоэффективности применения рекуперативного торможения на поездоучастках / А. С. Вильгельм, А. В. Язов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока – 2012. – № 1. – С. 390-393.
27. Вильгельм А. С. Экспериментальные исследования по оценке потенциала повышения энергетической эффективности тяги поездов за счет примене-

- ния рекуперативного торможения / А. С. Вильгельм, А. Н. Ларин // Известия Транссиба. – 2011. – № 1 (5). – С. 50-56.
28. Кузнецов В. Г. Уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети за счет регулирования графика движения поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Техническая электродинамика: Тематическое издание. – 2012. – С.107-110.
29. Czuchra W. Ocena energochłonności tramwajów z napędem asynchronicznym / W. Czuchra, J. Prusak, W. Zajac // 7th International Conference «Modern Electric Transport in Integrated XXI st Century Europe». – Warsaw, 2005. – P. 160-164.
30. Быков Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование / Е. И. Быков. – Москва : Транспорт, 1983. – 447 с.
31. Мирошниченко Р. И. Режимы работы электрифицированных участков / Р. И. Мирошниченко. – Москва : Транспорт, 1982. – 207 с.
32. Сулима С. Д. Повышение эффективности рекуперативного торможения электровозов постоянного тока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к. т. н. Днепропетровск. 2001. 19 с.
33. Устименко Д. В. Підвищення ефективності тяги поїздів шляхом удосконалення систем рекуперативного гальмування. Автореферат дисертацій на здобуття наукового ступеня к. т. н. Дніпропетровськ. 2006. 21 с.
34. Математическое моделирование динамики электровозов / А. Г. Никитенко, Е. М. Плохов и др.; Под ред. А. Г. Никитенко. – Москва : Высшая школа, 1998. – 274 с.
35. Назаров Н. С. Рекуперативное торможение на электровозах переменного тока – эффективное средство энергосбережения / Н. С. Назаров, А. П. Краснопеев, Д. С. Драничников // Энергосбережение: технологии, приборы, оборудование: Сборник научных трудов. – 2009. – С. 24-31.
36. Бакланов А. А. Классификация методов оценки эффективности рекуперативного торможения / А. А. Бакланов, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Вестник РГУПС. – 2016. – № 1. – С. 26-33.

37. Незевак В. Л. Об оценке влияния параметров графика движения на энергоэффективность перевозок в условиях применения рекуперативного торможения / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – Новосибирск, 2015. – С. 478-482.
38. Незевак В. Л. Оценка влияния межпоездной обстановки на расход электроэнергии в условиях рекуперативного торможения / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин, В. В. Эрбес // Материалы научной конференции. – Омск, 2015. – С. 109-116.
39. Незевак В. Л. Оптимизация графика движения поездов по критерию расхода электроэнергии на тягу на участках железных дорог в условиях применения рекуперативного торможения // В. Л. Незевак, А. П. Шатохин, О. В. Гателюк / Известия Транссиба. – 2015. – № 1(21). – С. 59-69.
40. Сберегающие технологии тягового электроснабжения с рекуперацией энергии торможения поездов / А. Т. Бурков, В. М. Варенцов, А. Н. Маринкин и др. // 2-ая Евроазиатская конференция по транспорту : тезисы докладов. – С-Пб, 2000. – С. 93.
41. Макашева С. И. Влияние рекуперативного торможения на качество электрической энергии по напряжению и эффективность работы системы тягового электроснабжения. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. Хабаровск. 2002. 20 с.
42. Комякова О. О. Анализ качества электрической энергии, возвращаемой инверторами тяговых подстанций постоянного тока в сеть энергосистем / О. О. Комякова, А. А. Комяков, А. С. Вильгельм // Известия Транссиба. – 2012. – № 3 (11). – С. 71-78.
43. 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.

44. Машкин А. Г. Совершенствование методов анализа и средств повышения качества электрической энергии и эффективности электропотребления в точках общего присоединения тяговых подстанций. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Красноярск. 2012. 40 с.
45. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць : монографія / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий. – Дніпропетровськ : «Стандарт-Сервіс», 2015. – 344 с.
46. Сиченко В. Г. Розвиток наукових основ підвищення електромагнітної сумісності підсистем електричної тяги постійного струму залізничного транспорту. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д.т.н. Дніпропетровськ. 2011. 42 с.
47. Костін М. О. Якість електроенергії, рекуперованої електровозами ВЛ11М6 і ВЛ11М / М. О. Костін, А. М. Муха, А. В. Нікітенко // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 10. – С. 108-116.
48. Черемисин В. Т. Совершенствование методов расчета режимов приема и потребления электрической энергии в условиях несимметрии и несинусоидальности электротяговой нагрузки переменного тока. Автореферат на соискание ученой степени д.т.н. Омск. 1996. 37 с.
49. 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. 73-79.
50. Костин Н. А. Отрицательная активная мощность электроподвижного состава постоянного тока / Н. А. Костин, О. И. Саблин // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2009. – № 83. – С. 32-36.
51. 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.

52. Саблин О. И. Определение составляющих полной мощности ЭПС на основе общих уравнений электромагнитного поля / О. И. Саблин // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – 2012. – № 66. – С. 161-166.
53. Коефіцієнт потужності і реактивної потужності трамваїв / М. О. Костін, О. І. Саблін, О. Г. Шейкіна та ін. // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2013. – № 91. – С. 124-131.
54. 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.
55. 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.
56. Привалов С. Я. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях протекания уравнительных токов и применения рекуперативного торможения. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. Омск. 2011. 19 с.
57. Пулін М. М. Проблеми перемикання тягової підстанції з випростовувального режиму в інверторний і навпаки / М. М. Пулін, О. І. Скрипник // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2003. – № 479. – С. 161-165.
58. Шевлюгин М. В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии. Автореферат на соискание ученой степени д.т.н. Москва. 2013. 49 с.
59. Шевлюгин М. В. Снижение расхода энергии и рабочей мощности основного силового оборудования тяговых подстанций электрических железных дорог с помощью накопителей энергии : монография / М. В. Шевлюгин. – 2007. – 151 с.

60. Саблін О. І. Підвищення ефективності електроспоживання електрорухомого складу постійного струму. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2009. 22 с.
61. 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.
62. ГОСТ 13109-97 «Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення», Київ: Держстандарт, 1999.
63. Бут Д. А. Накопители энергии / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин и др. / Под ред. Д. А. Бута. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.
64. Костин Н. А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной и энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н. А. Костин, А. В. Никитенко // Залізничний транспорт України. – 2014. – № 3. – С. 15-22.
65. Нікітенко А. В. Збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоїздах постійного струму / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 3. – С. 25-31.
66. Хворост Н. В. Накопитель энергии для тяговой сети метрополитена / Г. В. Омеляненко, Н. В. Хворост, В. Е. Бондаренко // Вісник НТУ ХПІ. – 2005. – №36. – С. 47-56.
67. Сулим А. А. Обоснование места установки емкостных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения метрополитена / А. А. Сулим // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2013. – № 2/2013 (22), ч. 2. – С. 282-285.
68. Любарский Б. Г. Сравнительный анализ накопителей энергии для транспортных средств / Б. Г. Любарский, В. П. Шайда, С. Г. Буряковский // Залізничний транспорт України. – 2015. – № 6 (115). – С. 13-21.
69. Омеляненко В. И. Работа бортового электромеханического инерционного накопителя энергии в тяговом приводе пригородного электропоезда / В. И.

- Омельяненко, Л. В. Оверьянова // Залізничний транспорт України. – 2015. – №1 (110). – С. 44-49.
70. Омельяненко В. И. Накопители энергии – перспективная технология для железных дорог / В. И. Омельяненко, В. Е. Бондаренко, Г. В. Омельяненко, Л. В. Оверьянова // Локомотив-інформ. – 2011. – № 4. – С. 4-9.
71. Любарский Б. Г. Концептуальный проект пригородного электропоезда с инерционным накопителем энергии / Б. Г. Любарский, В. И. Омельяненко, Л. В. Оверьянова, Е. С. Рябов // Локомотив-інформ. – 2013. – № 11. – С. 6-11.
72. Петрушин Д.А. Повышение эффективности рекуперативного торможения электровозов постоянного тока путем использования в тяговой сети инерционного накопителя энергии со встроенной вентильно-индукторной электрической машиной. Автореферат на соискание ученой степени к.т.н. Ростов-на-Дону. 2002.
73. Штанг А. А. Применение накопителей энергии в системах электроснабжения городского электрического транспорта / А. А. Штанг, Е. А. Спиридонов, М. В. Ярославцев // Транспорт Российской Федерации. – 2012. – № 34. – С. 68–70.
74. Штанг А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Новосибирск. 2006. 19 с.
75. Черняк Ю. В. Анализ повышения эффективности потребления электроэнергии на электропоездах путем установки накопителей энергии / Ю. В. Черняк, А. В. Гаюр, М. О. Ревчук // Зб. наук. праць ДЕГУТ. Серія «Транспортні системи і технології». – 2012. – №. 20. – С. 142–144.
76. Рябцев Г. Г. Конденсаторные накопители энергии метровагонов / Г. Г. Рябцев, И. В. Семенов, И. А. Ермаков // Мир транспорта. – 2011. – №1 (34). – С.74-78.

77. Клинов В. Ю. Емкостные накопители в системе электроснабжения метрополитена / В. Ю. Клинов, Ю. А. Бродский, А. И. Подаруев, В. Н. и др. // Русский инженер. – 2008. – №1. – С. 62-65.
78. Yan G. Electrochemical polymerization and energy storage for poly as supercapacitor electrode material / G. Yan., J. Li, Y. Zhang etc. // Journal of Physical Chemistry. – 2014. – V. 118. – № 19. – P. 9911-9917.
79. Sevilla M. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage / M.Sevilla, R. Mokaya // Energy & Environmental Science. – 2014. – V. 7. – № 4. – P. 1250-1280.
80. Carlen M. W. Testing and Modelling of SuperCap Applications. / M. W. Carlen, T. Christen // Proceedings of the 7th International Seminar on DLC and Similar Energy Storage Devices. Deerfield Beach, FL, USA.1997.
81. Farahmandi C. J. Comparison of Electrochemical Capacitors and Batteries for Short Duration UPS Applications. / C. J.Farahmandi, D. Gideon // Proceeding of the 6th International Seminar on DLC and Similar Energy Storage Devices. Deerfield Beach, FL, USA.–1996.
82. Крюков А. В. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных накопителями энергии / А. В. Крюков, А. В. Черепанов // Естественные и инженерные науки – развитию регионов Сибири : тез. XIII (XXXV) Всерос. науч.-техн. конф. – Братск, 2014. – С. 4.
83. Незевак В. Л. Сравнение вариантов применения накопителей электрической энергии на участках постоянного тока железных дорог / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // От проектного инжиниринга к строительному : материалы IV научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «ОМСКНЕФТЕХИМПРОЕКТ». – Омск, 2013 г. – С. 90-92.
84. Шатохин А. П. Перспективные места установки накопителей электрической энергии // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов : материалы 2-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Омск, 2014. – С. 162-168.



85. Незевак В. Л. О подходе к оценке энергоемкости накопителя электрической энергии для электроподвижного состава на полигоне постоянного тока железных дорог / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // труды международной научно-практической конференции / РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2015. – С. 169-171.
86. Незевак В. Л. К вопросу о выборе накопителя на участках постоянного тока с применением рекуперативного торможения // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте : материалы научно-практической конференции. – Омск, 2013. – С. 30–36.
87. Черемисин В. Т. Повышение эффективности системы тягового электрообеспечения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии / В. Т. Черемисин, В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия ТПУ. – 2015. – Т. 326, № 10. – С. 54-64.
88. Незевак В. Л. О сравнении эффективности применения управляемых и неуправляемых емкостных накопителей энергии на электроподвижном составе / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Материалы научно-практической конференции Омского гос. ун-та путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 206-213.
89. Шевлюгин М. В. Криогенные накопители энергии в системе тягового электрообеспечения железных дорог / М. В. Шевлюгин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2007. – С. 101-105.
90. Шевлюгин М. В. Энергосберегающие схемы тягового электрообеспечения железных дорог на базе сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии / М. В. Шевлюгин // Электротехника. – 2008. – №7. – С. 28-34.
91. Шевлюгин М. В. Возможность использования возобновляемых источников энергии в системе тягового электрообеспечения железных дорог / М. В. Шевлюгин, А. А. Жуматова // Наука и техника транспорта. – 2008. – №4. – С. 25-28.

92. Шевлюгин М. В. Внедрение энергосберегающих технологий на метрополитен. / М. В. Шевлюгин, Д. В. Гаев, А. В. Ершов и др. // Мир транспорта. – 2010. – № 3. – С. 3-7.
93. Шевлюгин М. В. Преобразовательный агрегат ёмкостного накопителя энергии для системы тягового электроснабжения метрополитена / М. В. Шевлюгин, В. А. Гречишников, А. И. Подаруев // Электротехника. – 2011. – №5. – С. 17-33.
94. Шевлюгин М. В. Теоретическое обоснование эффективности использования накопителей энергии неуправляемого типа в системе тягового электроснабжения метрополитена / М. В. Шевлюгин, В. А. Гречишников // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2013. – №5. – С. 17-19.
95. Программный комплекс «Электроснабжение метрополитена»: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005610082 / Шевлюгин М. В., Абрамсон В. М., Андреев В. В. и др. / Зарегистрировано 11.01.2005. – Москва : Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 11-01-2005.
96. Программный комплекс «Моделирование процесса энергопотребления электроподвижного состава железных дорог и метрополитенов с накопителями энергии на борту»: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2005611422 / Шевлюгин М. В./ Зарегистрировано 14.06.2005. – Москва : Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 14-06-2005.
97. Программный комплекс «Расчет параметров сверхпроводящего индуктивного накопителя энергии для использования на тяговых подстанциях железных дорог»: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006611590 / Шевлюгин М. В./ Зарегистрировано 12.05.2006. – Москва : Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 12-05-2006.
98. Зарядное устройство для емкостного накопителя энергии: Пат. 53826 РФ МПК В60М3/00 (2006.01), Н02J1/00 (2006.01) / Шевлюгин М. В., Пупынин

- В. Н.; Заявитель и патентообладатель МГУПС. – № 2014112916; заявл. 02.04.2005; опубл. 20.11.2005 бюл. № 32.– 6 с.
99. Устройство накопления электроэнергии для аварийного тягового питания электроподвижного состава: Пат. 56736 РФ МПК В60М3/00 (2006.01), Н02J1/00 (2006.01) / Шевлюгин М. В., Желтов К. С.; Заявитель и патентообладатель МГУПС. – № 2015114253; заявл. 05.06.2006; опубл. 21.12.2006 бюл. № 38.– 6 с
100. Программный комплекс «Расчёт системы электроснабжения при работе подвижного состава с рекуперацией»: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011610650 / Шевлюгин М. В., Балакина Е. П., Баранов Л. А. и др. // Зарегистрировано 11.01.2011. – Москва : Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 11-01-2011.
101. Программный комплекс «Модель линии метрополитена для определения эффективности включения режима рекуперации»: Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011610651 / Шевлюгин М. В., Балакина Е. П., Баранов Л. А. и др. // Зарегистрировано 11.01.2011. – Москва : Федеральная служба по интеллектуальной собственности, 11-01-2011.
102. Шевлюгин, М. В. Совершенствование системы тягового электроснабжения с помощью накопителей энергии / М. В. Шевлюгин // Соискатель – приложение к журналу «Мир транспорта». – 2007. – № 1, Т. 4. – С. 35-38.
103. Barrero R. Energy savings in public transport / R. Barrero, J. Van Mierlo, X. Tackoen // IEEE Veh. Technol. – 2008. – Mag. 3. – P. 26-36.
104. Barrero R. Stationary or onboard energy storage systems for energy consumption reduction in a metro network / R. Barrero, X. Tackoen, J. Mierlo // P. I. Mech. Eng. F-J Rai. – 2010. – № 224. – P. 207-225.
105. Domínguez M. Energy efficiency on train control – design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices / M. Domínguez, A. P. Cucala, A. Fernández, etc. // In: 9th World Congress on Railway Research – WCRR. – 2011, Lille. – P. 569-581.

106. Miyatake M. Energy saving speed and charge/discharge control of a railway vehicle with on-board energy storage by means of an optimization model / M. Miyatake, K. Matsuda // IEEJ T. Electr. Electr. – 2009. – № 4. – P. 771-778.
107. Ciccarelli F. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand / F. Ciccarelli, D. Iannuzzi, P. Tricoli // Transport Res. C Emer. – 2012. – № 24. – P. 36-49.
108. Iannuzzi D. Metro trains equipped onboard with supercapacitors: a control technique for energy saving / D. Iannuzzi, P. Tricoli // SPEEDAM 2010 – International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – Pisa, 2010. – P. 126-138.
109. Allègre A.L. Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway / A. L. Allègre, A. Bouscayrol, P. Delarue, etc. // IEEE T. Ind. Electron. – 2010. – № 57. – P. 4001-4012.
110. Nasri A. Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems / A. Nasri, M. Fekri Moghadam, H. Mokhtari, // SPEEDAM 2010 – International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. Pisa, 2010. – P. 289-314.
111. Peña-Alcaraz M. Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative braking energy / M. Peña-Alcaraz, A. Fernández, A.P. Cucala, etc. // P. I. Mech. Eng. F-J Rai. – 2011. – № 226. – P. 397-408.
112. Boizumeau J. R. Braking energy recovery at the Rennes metro / J. R. Boizumeau, P. Leguay, E. Navarro // Workshop on Braking Energy Recovery Systems–Ticket to Kyoto Project. – Bielefeld, 2011.
113. Iannuzzi D. Optimal design of stationary supercapacitors storage devices for light electrical transportation systems / D. Iannuzzi, D. Lauria, P. Tricoli // Optim. Eng. – 2012. – № 13. – P. 689-704.
114. Brenna M. Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems / M. Brenna, F. Foadelli, E. Tironi, D. Zaninelli // In: International Conference on Clean Electrical Power – ICCEP. – Capri, 2007. – P. 489-505.

115. Teymourfar R. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line / R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini, etc. // *Energ. Convers. Manage.* – 2012. – № 56. – P. 206-214.
116. Iannuzzi D. Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks / D. Iannuzzi, F. Ciccarelli, D. Lauria // *Transport Res. C-Emer.* – 2012. – № 21. – P. 321-337.
117. Iannuzzi D. Wayside ultracapacitors storage design for light transportation systems: A multiobjective optimization approach / D. Iannuzzi, D. Lauria, F. Ciccarelli // *Rev. Electr. Eng.* – 2013. – № 8. – P. 190-199.
118. Morita G. Verification tests of electric double-layer capacitors for static energy storage system in DC electrified railway / G. Morita, T. Konishi, S. Hase, etc. // *SPEEDAM 2008 – International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion.* – Ischia, 2008.
119. Konishi T. Fixed energy storage technology applied for DC electrified railway / T. Konishi, H. Morimoto, T. Aihara, etc. // *IEEE T. Electr. Electr.* – 2010. – № 5. – P. 270-277.
120. Gelman V. Braking energy recuperation / V. Gelman // *IEEE Veh. Technol.* – 2009. - Mag. 4. – P. 82-89.
121. Cornic D. Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation / D. Cornic // *9th World Congress on Railway Research – WCRR.* – Lille, 2011.
122. Adinolfi A. Experimental assessment of energy saving due to trains regenerative braking in an electrified subway line / A. Adinolfi, R. Lamedica, C. Modesto, etc. // *IEEE T. Power Deliver.* – 1998. – № 4. – P. 1536-1541.
123. Foadelli F. Optimization of storage devices for regenerative braking energy in subway systems / F. Foadelli, M. Roscia, D. Zaninelli // *IEEE Power Engineering Society General Meeting – PES.* – Montreal, 2006.
124. Czerwiński A. New high-energy lead-acid battery with reticulated vitreous carbon as a carrier and current collector / A. Czerwiński, S. Obrębowski, Z. Rogulski // *Power Sources.* – 2012. – № 198. – P. 378-382.

125. Заруцкая Т. А. Исследование эффективности применения сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии на тяговой подстанции постоянного тока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Ростов-на-Дону. 2004. 20 с.
126. Носков В. Н. Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии в энергоустановках железнодорожного транспорта. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Ростов-на-Дону. 2010. 22 с.
127. Охотников Н. С. Повышение тяговых свойств электровозов при помощи накопителей энергии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Москва. 2010. 24 с.
128. Спиридонов Е. А. Повышение эффективности использования энергии в электротранспортных комплексах с накопительными устройствами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Новосибирск. 2010. 18 с.
129. Вильгельм А. С. Перспективы регулирования напряжения в системах тягового электроснабжения постоянного тока при применении рекуперативного торможения / А. С. Вильгельм, В. Л. Незевак; Московский гос. ун-т путей сообщения // Проблемы и перспективы развития транспорта: Материалы науч.-техн. конф. – Москва, 2012. – С.102-103.
130. Минаев Д. В. Оптимизация напряжения в контактной сети при эксплуатации электропоездов с рекуперативным торможением. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Москва. 2006. 19 с.
131. Марикин А. Н. Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Санкт-Петербург. 2008. 35 с.
132. Кондратьев Ю. В. Распределение потоков мощности в режимах тяги и рекуперации / Ю. В. Кондратьев, А. С. Вильгельм, А. Н. Ларин // Локомотив. – 2011. – № 5. – С. 33-34.

133. Бакланов А. А. Принципы выбора энергооптимальных скоростей движения и режима работы электровоза / А. А. Бакланов // Состояние и перспективы развития электроподвижного состава : Тезисы докладов. – Новочеркасск, 2003. – С. 118-120.
134. Блохин Е. П. Методика расчета оптимальных по расходу электроэнергии времен хода поезда / Е. П. Блохин, А. В. Слободян, Г. В. Евдомаха // Транспорт: Сб. научн. трудов ДИИТа. – 1999. – С.47-55.
135. Блохин Е. П. Выбор энергетически оптимальных режимов ведения поездов / Е. П. Блохин, А. Н. Пшинько, Г. В. Евдомаха и др. // Залізничний транспорт України. – 2001. – р№ 6. – С. 19-22.
136. Скалозуб В. В. Ресурсозберігаючі методи управління тягою поїздів і удосконалення конструкцій рухомого складу. Автореферат дисертації на наукового ступеня д.т.н. Дніпропетровськ. 2003. 35 с.
137. Бобирь Д. В. Удосконалення режимів ведення вантажного поїзда з електричною тягою. Автореферат дисертації на наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2007. 19 с.
138. Блиндюк В. С. До питання енергорационального ведення поїздів / В. С. Блиндюк // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. – 2015. – Вип. 158. – С. 96-104.
139. Блиндюк В. С. Визначення ефективних законів керування процесами руху електропоїздів / В. С. Блиндюк // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2016. – № 4. – С. 4-10.
140. Петренко О. М. Математична модель оптимального керування рухом електрорухомого складу на підставі вирішення рівнянь Гамільтона-Якобі-Беллмана / О. М. Петренко, Б. Г. Любарський // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2016. – № 2. – С. 19-24.
141. Петренко О. М. Алгоритм синтезу експертної системи управління рухом електрорухомого складу на основі рішення рівняння Гамільтона-Якобі-Беллмана / О. М. Петренко, Б. Г. Любарський, М. Л. Глєбова // Вісник

- Національного технічного університету ХПІ. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – 2016. – № 6. – С. 89-95.
142. Гетьман Г. К. Выбор оптимальных параметров электровозов для грузовых перевозок / Г. К. Гетьман // Залізничний транспорт України. – 2000. – № 3. – С. 47-51.
143. Гетьман Г. К. Научные основы определения рационального мощностного ряда грузовых электровозов для железных дорог Украины. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Днепропетровск. 2001. 41 с.
144. Гетьман Г. К. Метод расчета оптимальных мощностей тягового подвижного состава при дискретном распределении массы поездов / Г. К. Гетьман // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1999. – № 2. – С.44-47.
145. Добрынин Е. В. Оперативный контроль и прогнозирование показателей нагрузочной способности системы тягового электроснабжения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Самара. 2005. 34 с.
146. Кузнецов В. Г. Підвищення енергетичної ефективності електротранспорту шляхом удосконалення процесу перевезень / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // «Электрификация транспорта. Трансэлектро-2009»: Тези доп. міжнародної конф. – Дніпропетровськ, 2009. – С. 54-55.
147. Кузнецов В. Г. Энергооптимальное управление потоком поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // «Энергосбережение на железнодорожном транспорте»: Материалы 2-й международной научно-практ. конф. – Жденьево, 2011. – С.35-37.
148. Кузнецов В. Г. Повышение энергоэффективности электротранспорта постоянного тока путем оптимизации управления транспортным потоком / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников // «Электрификация транспорта. Трансэлектро-2011»: Материалы 5-й международной конф. – Днепропетровск, 2011. – С.40-41.



149. Кузнецов В. Г. Уменьшение потерь электроэнергии в контактной сети за счет регулирования графика движения поездов / В. Г. Кузнецов, К. А. Калашников, Д. А. Босый // Техническая электродинамика: Тематическое издание. – 2012. – С.107-110.
150. Калашников К. О. Зменшення втрат електроенергії в тяговій мережі постійного струму шляхом вибору раціональної дислокації тягових навантажень. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. Дніпропетровськ. 2014. 22 с.
151. Грунтов П. С. Управление эксплуатационной работой и качеством перевозок на железнодорожном транспорте: учеб. для вузов / П. С. Грунтов, Ю. В. Дьяков, А. М. Макаровичкин. – Москва: Транспорт, 1994. – 543 с.
152. Gonzalez D. Optimal design of a D. C. railway power supply system / D. Gonzalez, F. Manzanedo // Electric Power Conference, 2008. EPEC 2008. – IEEE Canada, 6-10-2008. – P.1-6.
153. Miyatake M. Numerical analyses of minimum energy operation of multiple trains under DC power feeding circuit / M. Miyatake, H. Ko // Power Electronics and Applications, 2007 European Conf. on. – 2-9-2007. – P.1-10.
154. White R. D. AC/DC railway electrification and protection / R. D. White // Electric Traction Systems, 2008 IET Professional Development course on. – 3-11-2008. – P. 258-305.
155. A DC traction power supply converter system with very low harmonics for railway vehicles / Z. Gang, L. Zhigang, W. Lei, D. Lijun // Vehicle Power and Propulsion Conf., 2008. VPPC '08. IEEE. - 3-9-2008. - P.1-6.
156. Митрофанов А. Н. Прогнозирование и управление электропотреблением тяги поездов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Самара. 2006. 47 с.
157. Литвинцев В.Г. Краткосрочное и оперативное прогнозирование потребления электрической энергии на тягу поездов методом интервальной регрессии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Омск. 2011. 16 с.

158. Гаранин М. А. Совершенствование расчета наличной пропускной способности железных дорог постоянного тока по условиям электроснабжения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Самара. 2004. 25с.
159. Шалимов М. Г. Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог: монография / М. Г. Шалимов, Г. П. Маслов, Г. С. Магай. – Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения, 2002. – 49 с.
160. Бурков А. Т. Развитие инфраструктуры энергообеспечения железнодорожного транспорта / А. Т. Бурков, А. В. Мизинцев, Е. В. Кудряшев // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – № 3 (28). – С. 28-33.
161. Хворост Н. В. Анализ расхода электроэнергии и энергосбережение на Харьковском метрополитене / Н. В. Хворост, В. И. Ляхов, М. В. Ляхов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті – 2005. – №4. – С. 87-90.
162. Хворост Н. В. Электрические железные дороги: этапы и перспективы развития / Н.В. Хворост, Н.В. Панасенко // Електротехніка і Електромеханіка. – 2003. – №4. – С. 104-114.
163. Хворост Н. В. Концепция новой структуры системы электрической тяги для метрополитена / Н. В. Хворост // Коммунальное хозяйство городов. – 2003. – Вып. 53. – С. 172-179.
164. Обратимый преобразователь для связи двух линий постоянного тока в системе распределенного тягового электроснабжения. / Н. В. Хворост, Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко и др. // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. – 2004. – №6. – С. 99-106.
165. Хворост М. В. Підвищення ефективності дванадцятипульсових випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітенів з повздовжньою високовольтною лінією живлення постійного струму / М. В. Хворост // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – №3. – С. 50- 54.

166. Хворост М. В. Базові положення теорії випрямлячів-стабілізаторів напруги для перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітенів з повздовжньою лінією постійного струму / М. В. Хворост // Комунальное хозяйство городов. – 2004. – № 60. – С. 326- 247.
167. Хворост М. В. Силові схеми перетворювальних агрегатів головних тягових підстанцій метрополітену з повздовжньою лінією живлення / М. В. Хворост, В. В. Божко // Електротехніка і Електромеханіка. –2005. – №1. – С. 106-109.
168. Хворост М. В. Система керування перетворювальними агрегатами тягових підстанцій з повздовжньою високовольтною лінією постійного струму. /М. В. Хворост, В. В. Замаруєв, В. В. Божко і др.// Віник НТУ ХПІ. – 2005. – №36. – С. 141-146.
169. Хворост М. В. Система електротягового забезпечення підвищеної ефективності для метрополітенів / М. В. Хворост, В. В. Божко // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №6. – С. 79-86.
170. Хворост М. В. Шляхи удосконалення перетворювальних агрегатів тягових підстанцій метрополітенів / М. В. Хворост // Вісник Східноукраїнського нац. ун-та. – 2008. – №5 (123). – С. 180-184.
171. Совершенствование электрической тяги постоянного тока железных дорог Украины для скоростного пассажирского движения / Н. В. Хворост, Ю. П. Гончаров, Н. В. Панасенко и др. // Залізничний транспорт України. – 2003. – №6. – С.11-18.
172. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи – Москва : Транспорт, 2001. – 464 с.
173. Аржанников Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока : монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2010. – 176 с.
174. Аржанников Б. А. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения : монография / Б. А. Аржанников. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 207 с.

175. Набойченко И. О. Повышение эффективности тягового электроснабжения постоянного тока / И.О. Набойченко, Б.А. Аржанников // Железнодорожный транспорт. – 2015. – № 12. С.31-34.
176. Аржанников Б. А. Автоматическое регулирование напряжения в системе электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ / Б. А. Аржанников, Л. А. Фролов. – Екатеринбург: УрГУПС, 2009. – 48 с.
177. Лобынцев В. В. Силовое оборудование систем тягового электроснабжения завтрашнего дня / В. В. Лобынцев, В. Н. Пупынин // Электричество. – 2007. – № 2. – С. 20-22.
178. Набойченко И. О. О некоторых аспектах применения системы управляемого тягового электроснабжения / И. О. Набойченко // Локомотив. – 2012. – № 12. – С. 39.
179. Кисляков В. А. Система электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока с вольтодобавочными устройствами / В. А. Кисляков // Тр. МИИТа. – 1975. – Вып. 451. – С. 105-108.
180. Rojek A. Traction power supply in 3 kV DC system. / A. Rojek // Warszawa: KOW media&marketing Sp. Z o.o., 2012. – 250 s.
181. Shelag A. Influence of voltage in 3 kV DC cafenary on traction and energy paramers of the supplied vehieles / A. Shelag // Radom: Spatium, 2013. – 158 s.
182. Косарев, Є. М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму / Є. М. Косарев // Електрифікація транспорту. – 2015. – №9. – с. 56-61.
183. Пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних: Пат. 95871 Україна, МПК G01R 19/257, H04W 4/20 / Босий Д. О.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U201408019; заявл. 16.07.14; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1. – 3 с.
184. Смирнов Д.Б. Совершенствование методики расчета распределенной системы тягового электроснабжения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. С.-Петербург. 2010. 22 с.

185. Марикин А. Н. Схемотехника современных тяговых подстанций постоянного тока и перспективные системы электроснабжения. // Eltrans`2001: материалы международного симпозиума. – С.-Пб, 2002. – С. 147-155.
186. Абрамов Н. А. Оперативное управление режимами систем тягового электроснабжения. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Иркутск. 2010. 19 с.
187. Абрамов Н. А. Управление режимами систем тягового электроснабжения на основе ситуационного подхода / Н. А. Абрамов, В. П. Закарюкин, А. В. Крюков // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 1 (25). – С.186-192.
188. Крюков А. В. Анализ эффективности технических средств для управления режимами систем тягового электроснабжения / А. В. Крюков, Н. А. Абрамов, В. П. Закарюкин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2010. – № 1 (25). – С. 124-132.
189. Крюков А. В. Ситуационное управление режимами систем тягового электроснабжения: монография / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин, Н. А. Абрамов. – Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2010. – 123 с.
190. Асташин С. М. Управление режимами и процессами эксплуатации систем тягового электроснабжения на основе имитационного моделирования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Иркутск. 2008. 17 с.
191. Мятёж А.В. Регулирование напряжения в системах электроснабжения с использованием нечеткой логики. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Новосибирск. 2009. 22 с.
192. Туликов А.Н. Управление режимами реактивной мощности и напряжения систем электроснабжения предприятий методами искусственного интеллекта. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Красноярск. 2007. 182 с.
193. Доманский В. Т. Система информационно-управляющего обеспечения рациональных режимов электропотребления электрифицированных линий

- железных дорог. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Москва. 1993. 48 с.
194. Землянов В. Б. Энергооптимальные технологии анализа и регулирования электропотребления на тягу поездов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Днепропетровск. 2000. 23 с.
195. Доманская Г. А. Энергосберегающие технологии тягового электроснабжения железных дорог с учетом режимов работы питающих их энергосистем. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Днепропетровск. 2007. 20 с.
196. Бадер М. П. Современные технологии для перехода к интеллектуальным системам электроснабжения / М. П. Бадер // Вестник РГУПС. – 2013. – № 2(50). – С.86-92.
197. Кузнецов В. Г. Развитие теоретических основ энергосбережения в системах электроснабжения тяги поездов постоянного тока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Днепропетровск. 2012. 41 с.
198. Костін М.О. Енергетичні спектри випадкових процесів тягових напруг і струмів електротранспорту / М. О. Костін // Електротехніка і електроенергетика. – 2015. – № 2. – С. 71-80.
199. Kostin M. O. Energy of Starting up to Speed of Dc Train / M. O. Kostin, A. V. Nikitenko // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 9. – С. 81-86.
200. Szelag A. Losses of Recovered Electric Energy in the Elements of a DC Electric Transport System / A. Szelag, M. Kostin, A. Nikitenko // International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC), 2016 : Proceedings of the 17th International Conference, September 25-30, 2016 (Varna, Bulgaria) / IEEE. – Varna, 2016. – P. 412-418.
201. Kostin M. Statistics and Probability Analysis of Voltage on the Pantograph of DC Electric Locomotive in the Recuperation Mode / M. Kostin, A. Nikitenko // Przegląd elektrotechniczny. – Warszawa, 2013. - № 2a. – P. 273-275.
202. Нікітенко А. В. Імовірнісно-статистичний і кореляційно-спектральний аналізи струму рекуперації електрорухомого складу постійного струму / А.

- В. Нікітенко, М. О. Костін // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 3 (51). – С. 51-64.
203. Жежеленко И. В. Спектральный анализ тока нагрузки источников интергармоник в промышленных электрических сетях / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2002. – №12. – С. 194-201.
204. Васильев В. А. Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Санкт-Петербург. 2012. 16 с.
205. Тер-Оганов Э.В., Пышкин А.А. Электроснабжение железных дорог: учебник. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.
206. 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.
207. 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.
208. 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.
209. Саблин О. И. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта / О. И. Саблин // Вестник НТУ«ХПИ». – 2013. – Вып. 38. – С. 186-189.
210. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
211. Крюков А. В. Моделирование электромагнитных влияний на смежные ЛЭП на основе расчета режимов энергосистемы в фазных координатах: монография / А. В. Крюков, В. П. Закарюкин. – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та путей сообщения, 2009. – 120 с.

212. Закарюкин В. П. Методы и алгоритмы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Иркутск. 2009. 32 с.
213. Пронтарский А. Ф. Системы и устройства электроснабжения – Москва: Транспорт, 1979. – 264 с.
214. Бурков А. Т. Методы расчета систем тягового электроснабжения железных дорог / А. Т. Бурков, В. М.Варенцов, С. Е.Кузин и др. – Ленинград : ЛИИЖТ, 1985. – 75 с.
215. Марквардт Г. Г. Определение избыточной энергии рекуперации / Г. Г. Марквардт // Сб. науч. тр. МИИТа. – 1957. – вып. 96. – С. 51-59.
216. Быкадоров А.Л., Доманский В.Т. Имитационное моделирование системы электроснабжения электрифицированного участка / А. Л. Быкадоров, В. Т. Доманский. – Днепропетровск: ДИИТ, 1985. – 60 с.
217. Тарута П. В. Разработка имитационной модели системы тягового электроснабжения для исследования эффективности использования энергии рекуперации // Ресурсосберегающие технологии на обособленных подразделениях Западно-Сибирской железной дороги : Материалы научно-практической конф. – Омск, 2003. – С. 14-16.
218. Куликов П. Б. О расчетном режиме для выбора параметров приемников избыточной энергии рекуперации на участках с холмистым профилем / П. Б. Куликов // Сб. науч.тр. ВЗИИТа. – 1980. – вып. 107. – С. 47-51.
219. Родина Л. С. Математическое моделирование систем электроснабжения / Л. С. Родина. – Москва: Моск. энерг. ин-т, 2003. – 247 с.
220. Советов Б.Я. Моделирование систем / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. - Москва: Высшая школа, 2001. – 343 с.
221. Асташин С. М. Управление режимами и процессами эксплуатации систем тягового электроснабжения на основе имитационного моделирования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Иркутск. 2008. 17 с.



222. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – Москва : Наука, 1968. – 356 с.
223. Михаліченко П. Є. Наукове обґрунтування та розробка засобів підвищення ефективності роботи системи електричної тяги постійного струму при аварійних режимах. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня д.т.н. Дніпропетровськ. 2013. 41 с.
224. 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.
225. 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.
226. Саблін О. І. Принципи оптимального розподілення рекуперативної енергії в системі електротранспорту / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов // «ТРАНСЕЛЕКТРО-2014» : тезиси докл. VII міжнародної науково-практ. конф. «Електрифікація транспорту». – Днепропетровск, 2014. – С. 51.
227. Kosko B. Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence / B. Kosko // NJ, Prentice Hall, 1992, 449 p.
228. Гибридные нейро-фаззи модели и мультиагентные технологии в сложных системах / Е. В. Бодянский, В. Е. Кучеренко, Е. И. Кучеренко и др. // под ред. Е. В. Бодянского. – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 403 с.
229. Горбачев С. В. Нейро-нечеткие методы в интеллектуальных системах обработки и анализа многомерной информации / С. В. Горбачев, В. И. Сырякин. – Томск : Изд-во Томского ун-та, 2014. – 441 с.
230. Computational Intelligence. A Methodological Introduction / R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn, ect. // London, Springer Verlag, 2013. – 490 p.

231. Drepper, U. What Every Programmer Should Know About Memory / U. Drepper // RedHat, Inc., 2007. – 114 p.
232. Springer Handbook of Computational Intelligence / Eds. J. Kasprzyk, W. Pedrycz. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2015. 1634 p.
233. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский : пер. с польск. – Москва: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.
234. Bodyanskiy Ye. Hybrid Adaptive Wavelet-Neuro-Fuzzy System for Chaotic Time Series Identification / Ye. Bodyanskiy, O. Vynokurova // [Information Sciences](#). – 2013. – Vol. 220. – P. 170-179.
235. Bodyanskiy Ye. Modified Probabilistic Neuro-Fuzzy Network for Text Documents Proc. / Ye. Bodyanskiy, I Pliss, V. Volkova // International Journal of Computing. – 2012. – Vol. 11. – [Issue](#) 4. – P. 391-396.
236. Jang J.-S. R. Neuro-Fuzzy and Soft Computing – Computational Approach to Learning and Machine Intelligence / J.-S. R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani. New Dehli, PHI Learning, 2010. – 614 p.
237. Mukherjee V. Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System / V. Mukherjee, S. P. Ghoshal // Electric Power Systems Research. – 2007. – Vol. 77. – [Issue](#) 12. – P. 1689-1698.
238. Niu B. A. Multi-Swarm Optimizer Based Fuzzy Modeling Approach for Dynamic Systems Processing / B. Niu, Y. Zhu, X. He, H. Shen // Neurocomputing. – 2008. – Vol 71. – [Issues](#) 7-9. – P. 1436-1448.
239. Sood A. Crossroads in Classification: Comparison and Analysis of Fuzzy and Neuro-Fuzzy Techniques / A. Sood, S. Aggarwal // International Journal of Computer Applications. – 2011. – Vol. 24. – [No](#) 2. – P. 13-17.
240. Jenopaul P. Neuro-Fuzzy Based Constant Frequency-Unified Power Quality Conditioner / P. Jenopaul, T. Ruban D. Prakash // International Journal of System Signal Control and Engineering Application. – 2011. – Vol.4. – [Issue](#) 1. – P. 10-17.

241. Kori A. K. Neuro Fuzzy System Based Condition Monitoring of Power Transformer / A. K. Kori, A. K. Sharma, A. K. S. Bhadoriya // International Journal of Computer Science. – 2012. – Vol. 9. – Issue 2. – No 1. – P. 495-499.
242. Shynkarenko V. I. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure / V. I. Shynkarenko, V. M. Ilman. // Cybernetics and Systems Analysis. – 2014. – Vol. 50. – Issue 5. – P. 655-662.
243. Shynkarenko V. I. Structural Models of Algorithms in Problems of Applied Programming. I. Formal Algorithmic Structures / V. I. Shynkarenko, V. M. Ilman, V. V. Skalozub // Cybernetics and Systems Analysis. – 2009. – Vol. 45. – Issue 3. – P. 329-339.
244. Mozgovoy M. Automatic Student Plagiarism Detection: Future Perspectives / M. Mozgovoy, T. Kakkonen, G. Cosma // Journal of Educational Computing Research. – 2010. – Vol. 43(4). – P. 507-527.
245. Mozgovoy M. Desktop Tools for Offline Plagiarism Detection in Computer Programs / M. Mozgovoy // Informatics in Education. – 2006. – Vol. 5. – No. 1. – P. 97-112
246. Passino K. M. Fuzzy Control / K. M. Passino. – Addison Wesley Longman, 1998. – 586 p.
247. Wang L. X. A Course in Fuzzy Systems and Control / L. X. Wang. – Prentice Hall, 1997. – 258 p.
248. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MathLab и FuzzyTech / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
249. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control / . Piegat. – Physica-Verlag, Heidelberg, 2001. – 356 p.
250. Носков В.И. Контроль и диагностика моторвагонных поездов с использованием нейронных сетей / В.И. Носков, М.В.Липчанский, В.С. Блиндюк // Комунальне господарство міст. – 2011. – № 101. – С. 278-283.

251. Чепцов М.М. Нейромережеве моделювання в системах керування на залізничному транспорті: монографія / М.М. Чепцов, В.С. Блиндюк, Д.М. Кузьменко – Донецьк : Вид-во «ДонІЗТ». – 2013. – 143 с
252. Кузьменко Д.М. Деградаційний аналіз надійності нейродинамічної функціональної моделі. / Д.М. Кузьменко, В.С. Блиндюк, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. – 2011. – Вип. 124. – С. 68-77.
253. Кузьменко Д.М. Аналіз залежності показників надійності нейродинамічної функціональної моделі від кількості ліній затримок / Д.М. Кузьменко, В.С. Блиндюк, М.М. Чепцов // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – 2011. – Вип. 26. – С. 71-77.
254. Блиндюк В.С. Моделювання пускових характеристик тягових двигунів моторвагонних рухомих одиниць / В.С. Блиндюк // Зб. наук. праць ДонІЗТ. – 2012. – С. 96-105.
255. 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.
256. Constructive simulation of regenerative power distribution zone in the dc electric traction system / O. I. Sablin, V. I. Shinkarenko, V. G. Kuznetsov, A. P. Ivanov // Najnowsze technologie w transporcie szynowym, Instytut Kolejnictwa, Warsaw, Poland, 18-19 November, 2016. – P. 105-106.
257. 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.
258. Саблін О. І. Оптимізація режимів тягового електроспоживання та рекуперації енергії в системах електричного транспорту / О. І. Саблін // Електрифікація транспорту. – 2016. – № 11. – С. 53-61.
259. 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.
260. 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.
261. 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.
262. 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.
263. Саблін О. І. Принцип інтелектуального управління розподілом струму рекуператії транспортних засобів в системі тягового електропостачання / О. І. Саблін // «Енергооптимальні технології перевізного процесу» : тези доп. II Міжнародної науково-практ. конф. – Львів, 2017. – С. 46.
264. Сизганова Е. Ю. Прогнозирование электропотребления и оценка потенциала энергосбережения машиностроительного предприятия: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Е.Ю. Сизганова; КрГТУ. – Красноярск, 2001. – 21 с.
265. Кузнецов В. Г., Костюковский Б. А. Оценка потенциала энергосбережения систем тягового электроснабжения постоянного тока / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2012. – № 26. – С. 109-116.

266. Оцінка обсягів скорочення викидів парникових газів за рахунок зниження технологічних витрат в розподільчих мережах України : звіт з НДР / кер. Б. А. Костюковський. – К. : Інститут загальної енергетики, 2011. – 111 с.
267. 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.
268. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена / В. Г. Кузнецов, О. И. Саблин, П. В. Губский и др. // Гірнича електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ. – 2015. – Вип. 95. – С. 35-43.
269. 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.
270. Ерошенко А. В. Разработка системы оперативного контроля удельного расхода электроэнергии отдельными поездами на участке магистральной железной дороги постоянного тока. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Омск. 2008. 16 с.
271. Давыдов А. И. Повышение эффективности системы анализа и нормирования энергопотребления на тягу поездов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Омск. 2012. 18 с.
272. Сидорова Е. А. Методика планирования и нормирования возврата электрической энергии в контактную сеть при применении рекуперативного торможения / Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов // Известия Транссиба. – 2012. – № 2 (10). – С. 94-112.
273. Хряков А. А. Разработка методов и технических средств определения расхода электрической энергии на тягу поездов постоянного тока по зонам

- учета Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. Омск. 2011. 18 с.
274. Хряков А. А. Расчет расхода электрической энергии в зонах учета электрической тяги постоянного тока с использованием новых технических средств / А. А. Хряков // Известия Транссиба. – 2011. – № 2 (6). – С. 42-45.
275. Железняк С. П. Методика учета энергетических результатов поездки по маршруту машиниста / С. П. Железняк // Наука и современность-2010: Материалы междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2010. – С. 202-206.
276. Незевак В.Л. Мониторинг выполнения норм удельной рекуперации в границах произвольной зоны мониторинга участка постоянного тока / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // Известия Транссиба. – 2015. – № 22. – С. 87-96.
277. Саблин О. И. Влияние динамических режимов электропотребления электротранспорта на точность измерения электроэнергии / О. И. Саблин, А. И. Кийко // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2011. – № 86. – С. 12-16.
278. Незевак В. Л. Расчетно-статистический способ определения объемов рекуперации по сети железных дорог на основе регрессионной модели / В. Л. Незевак, А. П. Шатохин // «Технологическое обеспечение ремонта и повышения динамических качеств железнодорожного подвижного состава»: материалы III Всероссийской научно-практической конференции. – Омск, 2015. – С.123-131.
279. Сидорова Н. Н. Повышение эффективности рекуперативного торможения в электрической тяге / Н. Н. Сидорова, О. В. Третинников, В. П. Феоктистов // Наука и техника транспорта.– 2015.– № 1.–С.19-22.
280. Сидорова Е. А. Статистический метод нормирования энергии рекуперации / Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов // Локомотив.– 2012. – № 5. – С.35-37.
281. Сидорова Е. А. Автоматизированный анализ эффективности рекуперативного торможения / Е. А. Сидорова, А. И. Давыдов // Локомотив. – 2011. – № 5. – С.30-32.
282. Шатохин А. П. Основные требования, предъявляемые к системе мониторинга эффективности применения и использования энергии рекуперации /

- А. П. Шатохин // Труды международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону, 2015. – С. 127-128.
283. Давыдов А. И. Анализ эффективности возврата электроэнергии в контактную сеть при рекуперативном торможении электроподвижного состава / А. И. Давыдов // Известия Транссиба. – 2011. – № 1 (5). – С. 56-63.
284. 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.
285. 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.
286. 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.
287. 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.
288. Intelligent Technologies for Efficient Power Supply in Transport Systems / D. O. Bosyi, O. I. Sablin, I. Yu. Khomenko, Y. M. Kosariev, I. Yu. Kebal, S. S. Myamlin // Transport Problems. – 2017. – № 12 (SE). – P. 57–71.
289. 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.
290. 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 // Еле-



- ктромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – № 5. – С. 46-51.
291. Саблін О. И. Проблемы использования избыточной энергии рекуперации в системе электрической тяги / О. И. Саблін // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. – 2013. – № 6. – С. 32-37.
292. 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.
293. 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.
294. Саблін О. И. Критерии эффективности электропотребления электротранспорта / О. И. Саблін, В. В. Артемчук // Энергосбережение на железнодорожном транспорте : тезисы докл. III международной научно-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2012. – С. 70-71.
295. Саблін О. І. Сучасний стан проблеми використання рекуперації електроенергії в системі електричного транспорту / О. І. Саблін // «Энергосбережение на железнодорожном транспорте и в промышленности» : материалы V международной научно-практ. конф. – Днепропетровск, 2014. – С. 129.
296. 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». – Warszawa, Jozefow. – P. 59.
297. Саблін О. І. Підвищення ефективності режимів рекуперації енергії електротранспорту 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.
298. 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.
299. 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.
300. 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.
301. 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.

**ДОДАТОК А**

Програми експериментальних досліджень режимів рекуперації електроенергії в  
системах електрифікованого транспорту

## МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДП «ЛЬВІВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання  
Львівської залізниці



*М. О. Фесик*  
М. О. Фесик

## ПРОГРАМА

експериментальних вимірювань параметрів енергетичних процесів та показників якості електроенергії на присьднаннях тягових підстанцій постійного струму на ділянці Тухля-Лавочне

Узгоджено:

Начальник Дорожньої електротехнічної лабораторії Львівської залізниці



А. І. Барна

Узгоджено:

Проректор з наукової роботи ДНУЗТ ім. ак. В. Лазаряна, д.т.н., проф.



С.В. Мямлін

м. Дніпропетровськ  
2014

## Мета експерименту

Експериментальним шляхом дослідити вплив режимів роботи тягових підстанцій постійного струму в умовах тягового і нетягового споживання та рекуперації електроенергії на рівень спотворення якості електричної енергії на приєднаннях змінного струму 10 (35) кВ.

Провести синхронізоване осцилографування струмів та напруг на приєднаннях 3,3 кВ постійного струму.

Експериментальним шляхом визначити показники якості електроенергії на вводах і фідерах тягових підстанцій постійного струму.

Дослідити вплив рівня завантаження мережі 10 (35) кВ на ефективність процесу реверсування надлишкової електроенергії рекуперації до нетягових споживачів.

Дослідити зв'язок потужності (струму) надлишкової рекуперації поїздів з величиною напруги на шинах 3,3 кВ при існуючих графіках руху поїздів, оцінити вплив потужності рекуперації на показники якості електроенергії на шинах 10 (35) кВ.

Визначити раціональні рівні напруги на шинах тягових підстанцій та раціональну кількість паралельно працюючих силових і перетворювальних трансформаторів, випрямних агрегатів.

Розробити рекомендації щодо підвищення ефективності використання рекуперативної енергії.

Розробити рекомендації щодо виявлення джерел погіршення якості електричної енергії та його впливу на баланс електричної енергії.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідній ділянці Тухля – Славське – Лавочне Львівської залізниці.

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

### Умови проведення експерименту

1. Кліматичні умови: Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища – 10 ... + 40 °С.
2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії	3
2.	Датчик змінного струму LEM-Flex	9
3.	Датчик напруги LEM LV100-3000	1
4.	Датчик постійного струму HOP 2000-SB/SP1	1
5.	Датчик постійного струму	2
6.	Високовольтний резистор дільника напруги ДН	3
7.	Аналогово-цифровий перетворювач типу USB-6009	1
8.	Комплект радіопередачі даних RFA1	4
9.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	6
10.	Цифровий мультиметр	1

\*до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

### Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Однолінійна схема тягових підстанцій	ЕЧЕ
2.	Схема живлення та секціонування контактної мережі ділянки	ЕЧЦ
3.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ
4.	Режими споживання електроенергії за даними АСКОЕ	БЕЛ
5.	Регістрограми напруги і струму за даними систем моніторингу та захисту Регіна, ЦЗАФ-3,3	РРД
6.	Паспортні дані силового обладнання тягових підстанцій, параметри контактної мережі ділянки, параметри системи зовнішнього електропостачання	ЕЧТ
7.	Поздовжній профіль ділянки	ЕЧТ

### Етап 2. Організація експерименту

Експеримент проводиться на тягових підстанціях: ЕЧЕ Лавочне, ПСК Славське та ЕЧЕ Тухля Львівської залізниці.

ЕЧ Стрий та ЕЧ Ужгород Львівської залізниці відповідно з програмою готують місця проведення вимірів на дослідних тягових підстанціях. Вимірювання проводяться одночасно в наступних точках:

1. вторинні кола ТН-35 кВ (ТН -10 кВ) (районне навантаження);
2. вторинні кола ТН-10 кВ (тягове навантаження);
3. фідери постійного струму 3,3 кВ.

Схеми приєднання засобів вимірювальної техніки в кожній точці наведені на рис. 1.

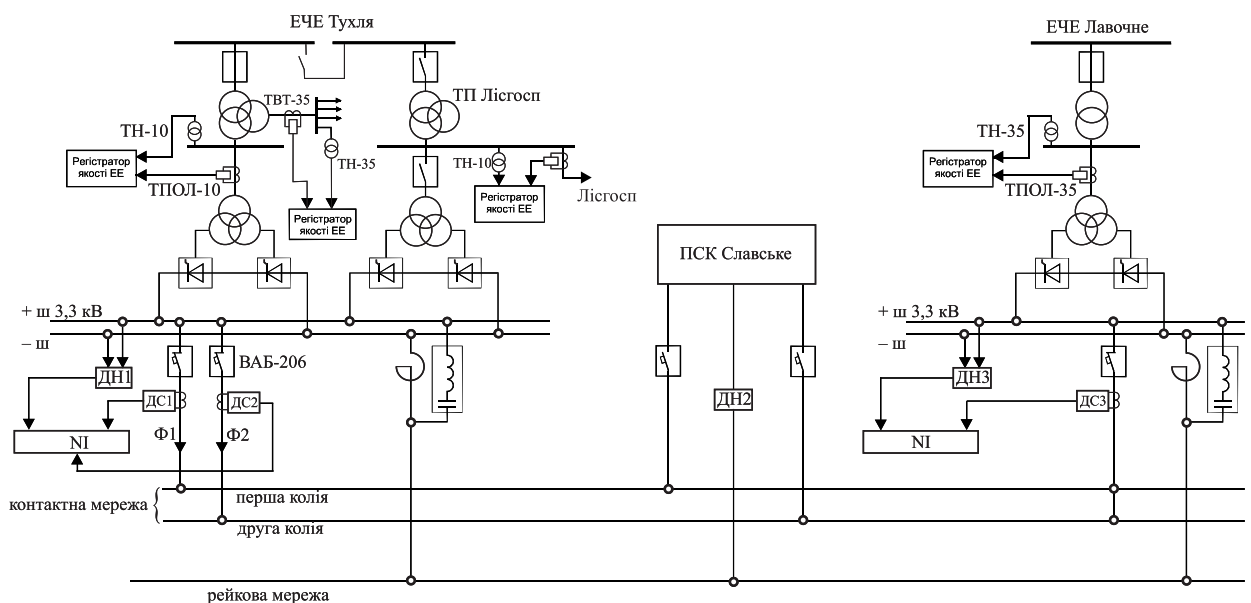


Рис 1. Загальна схема підключення вимірювальних приладів на тягових підстанціях

Для живлення аналізаторів, датчиків струму і напруги, портативних комп'ютерів під час вимірювань необхідний доступ до мережі 220 В власних потреб тягової підстанції.

Підключення вимірювальних пристроїв виконуються з дотриманням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Приєднання до рейкового фідеру (відсосу) тягової підстанції здійснюється за допомогою гнучких кліщів Роговського.

Підключення вимірювальних пристроїв здійснюється з додержанням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Живлення регістраторів та аналізаторів під час експерименту здійснюється від власних потреб тягової підстанції.

ДНУЗТ надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи. Для вимірювання також надаються прилади служб електропостачання (Fluke, Парма). Монтаж вимірювальних кіл проводять працівники РРД під контролем представника ДНУЗТ.

Оперативні перемикання у схемі живлення пристроїв електропостачання для проведення експерименту на ЕЧЕ Лавочне виконуються енергодиспетчером за погодженою зі службою та дистанцією електропостачання програмою.

Дату та час проведення експерименту визначає служба електропостачання Львівської залізниці. Служба призначає відповідальних за проведення експерименту та інструктажі причетних.

Конкретні затискачі, на які будуть приєднуватись вимірювальні прилади, дата і час проведення вимірів, відповідальні за проведення вимірів вказуються в розпорядженні по службі електропостачання Львівської залізниці.

Програми та розпорядчі документи щодо підготовки та узгодження з причетними схем живлення контактної мережі, сторонніх та залізничних споживачів з урахуванням забезпечення руху поїздів та електропостачання пристроїв СЦБ, зв'язку та інших здійснюють служби електропостачання у встановленому порядку.

Загальне керівництво проведенням вимірювань здійснює представник ДНУЗТ.

Порядок виконання оперативних перемикань та підключень вимірювальної техніки на ЕЧЕ Тухля та ЕЧЕ Лавочне наступний:

1. Відключити вимикач МВ-10 КВ-2 РУ-10 кВ
2. Відключити швидкодіючий вимикач БАОД КВ-2 РУ-3,3 кВ
3. Відключити шинні роз'єднувачі ШР-10 КВ-2, ±ШР КВ-2 РУ-3,3 кВ
4. Включити заземлюючі ножі Зн ШР-10 КВ-2, Зн КВ-2, Зн ±ШР КВ-2 РУ-3,3 кВ
5. Виконати приєднання датчиків струму ДС1, ДС2 у фідери Ф1 та Ф2 3,3 кВ
6. Підключити датчик напруги ДН1 до «+» та «-» шини.
7. Підключити до вимірювальних шунтів пристрої оптичної ізоляції.
8. Підключити пристрій оптичної ізоляції до шунта загальнопідстанційного струму.

9. Виконати підключення інформаційних каналів датчиків до портативного комп'ютера через пристрій узгодження.
10. Увести в роботу випрямний агрегат КВ-2, виконуючи відповідні дії у зворотній послідовності.

Порядок виконання оперативних перемикачів та підключень вимірювальної техніки на ПСК Славське:

1. Виконати необхідні відключення роз'єднувачів та включення заземлюючих ножів.
2. Підключити до «+» та «-» шини резистивний дільник напруги.
3. Підключити пристрій РД-140 до шунта загальнопідстанційного струму.

Загальне керівництво проведенням вимірювань здійснює представник ТОВ «ЕТС».

### **Етап 3. Проведення експерименту**

Вимірювання на ЕЧЕ Львівської залізниці необхідно провести у нормальному режимі роботи протягом повних 24 годин.

Інтервал проведення вимірів – 1 с. на всьому протязі експерименту.

### **Етап 4. Обробка отриманих результатів**

Проводиться обробка даних, зафіксованих реєстраторами та аналізаторами на тягових підстанціях.

Оброблені дані аналізуються, визначаються показники якості електроенергії на приєднаннях тягових підстанцій. Виконується обчислення балансу електроенергії в межах дослідної підстанції та розподіл електроенергії між дослідними підстанціями в тяговій мережі. Результати вимірювань зіставляються з даними системи комерційного обліку.

Відповідальні за проведення експерименту – служба електропостачання, кафедра електропостачання залізниць ДНУЗТ.

Експеримент проводять – представники кафедри електропостачання залізниць ДНУЗТ, представник служби, представники дистанції електропостачання, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

Розроблено:	д.т.н., с.н.с.	_____	В. Г. Сиченко
	д.т.н., професор	_____	В. Г. Кузнецов
	к.т.н., доцент	_____	О. І. Саблін
	к.т.н., доцент	_____	Д. О. Босий
	інженер	_____	В. А. Зубенко



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КП «ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН»

Затверджую:

Заступник директора  
КП «Дніпропетровський  
метрополітен» з технічних та  
експлуатаційних питань



Українець М.Є.

\_\_\_\_\_ 2014 р.

**ПРОГРАМА**

**експерименту по дослідженню витрати та генерації електроенергії  
електропоїздами метрополітену в режимах тяги і електричного гальмування  
в залежності від графіків руху**

Узгоджено:

Узгоджено:

Начальник електродепо метрополітену

Проректор з наукової роботи ДНУЗТ  
ім. ак. В. Лазаряна, д.т.н., проф.



Загоруйко В.Р.



Мямлін С.В.

Головний технолог електродепо,

к.т.н.

Виноградов О.Я.

м. Дніпропетровськ  
2014

### Мета експерименту

Провести експериментальне дослідження витрат та генерації електроенергії в режимах тяги та електричного (реостатного) гальмування електропоїздів метрополітену типу 81-714.5М (81-714.5М) при існуючих та збільшених розмірах руху.

Дослідити вплив режимів руху електропоїздів на витрати електроенергії на тягу та визначити норми витрат при діючих картах режимів ведення поїздів.

Дослідити вплив параметрів гальмування електропоїзду на кількість електроенергії, що може бути генерована при електричному гальмуванні.

Визначити показники якості електроенергії, що генерується електропоїздом при електричному гальмуванні.

Визначити шляхи раціонального використання енергії електричного гальмування електропоїздів та розробити рекомендації щодо її ефективного використання.

Виконати економічну оцінку доцільності модернізації електропоїздів метрополітену системою рекуперативного гальмування при існуючих та збільшених розмірах руху.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по ділянці метрополітену Вокзальна – Комунарівська.

Етап 2. Організація експерименту.

Етап 3. Проведення експерименту.

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій.

### Умови проведення експерименту

#### 1. Кліматичні умови

Температура навколишнього середовища +10 ... +40°C.

#### 2. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1	Вимірювальний комплекс NI cDAQ-9174	1
2	Датчики струму LEM	2
3	Датчики напруги LEM	2
4	Портативний комп'ютер (ноутбук)	1
5	Блок безперебійного живлення або інвертор напруги	1

\* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

### Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідженню

№ п/п	Найменування	Причетні
1	Схеми електричних кіл електропоїздів в режимі електричного гальмування	Електродепо
2	Схеми підключення швидкостеміра та електровимірювальних приладів в колах тягових двигунів	Електродепо
3	Діючий графік руху поїздів на ділянці	Техн. відділ
4	Звітність про споживання активної енергії поїздами	Техн. відділ

## Етап 2. Організація експерименту

Експеримент проводиться на електропоїзді метрополітену серії 81-714.5М (81-714.5М) без пасажирів під час його руху на ділянці Вокзальна – Комунарівська довжиною 7,8 км, що включає 6 станцій, в період часу з 10<sup>30</sup> до 14<sup>00</sup>.

Електродепо відповідно з програмою сприяє підготовці місця проведення вимірів та призначає відповідальних за проведення робіт по підключенню вимірювальних приладів. Заміри проводяться безпосередньо на електропоїзді працівниками ДПТУ.

Електродепо визначає електропоїзд, що складається з 5 вагонів та обладнаний лічильником електроенергії та готує його до експерименту. Для безперервного запису потрібних вимірюваних величин комп'ютером до силових кіл вагону електропоїзду за допомогою безконтактних датчиків струму та напруги LEM підключається вимірювальний комплекс NI cDAQ-9174. ДПТ надає необхідні пристрої та з'єднувальні проводи.

Підключення датчиків струму та напруги типу LEM здійснюється фахівцями відділення поїзних приладів автоматики та радіозв'язку електродепо. При виконанні приєднань вимірювальних приладів зміни в силовому колі вагону електропоїзду не виконуються. Приєднання датчиків постійного струму типу LEM до силового кола вагона виконуються без його розриву за рахунок роз'ємного осердя датчику. Безконтактні датчики струму LEM, що призначені для вимірювання відповідних струмів монтуються на силовий кабель у відповідних місцях і є ізольованими від струмоведучої частини силового кола вагону. Приєднання датчиків напруги з діапазоном вимірювання до 1500 В здійснюється безпосередньо до відповідних струмоведучих точок силового кола вагону.

Підключення вимірювальних перетворювачів до силового колу вагону електропоїзда виконується згідно схеми рис. 1. Поперечний переріз з'єднувальних проводів повинен становити не менше 1 мм<sup>2</sup>.

Живлення вимірювальних пристроїв під час експерименту здійснюється від інвертору напруги, що в свою чергу живиться від постійної напруги 80 В кіл власних потреб електропоїзду (від АКБ КН 80).

Вимірювання параметрів тягового режиму:

- для вимірювання напруги контактної мережі підключити датчик напруги **LEM U (Тяга)** до струмоведучої частини кола у проводі ИС 02 перед подільником напруги сітьового вольтметра та до неізольованої ділянки безпосередньо до (або після) коробок з'єднання КС-2 (рис.1);
- для вимірювання тягового струму вагону змонтувати безконтактний датчик струму **LEM I (Тяга)** на кабель Л01 вводу силового кола вагону безпосередньо після коробки з'єднань КС-1 між запобіжником і роз'єднувачем ГВ. Приєднати виходи датчика до другого каналу вимірювання струму приладу NI cDAQ-9174.

Вимірювання параметрів режиму електричного гальмування:

- для вимірювання напруги на якорях тягових електродвигунів у генераторному режимі підключити датчик напруги **LEM U (Торм)** безпосередньо до відповідного контакту контактора ПТ4 (або РК4, 6, 8, 10, 12, 14) та лінійного контактору в проводі Л96;

– для вимірювання генераторного струму групи тягових електродвигунів 2-4 змонтувати датчик струму **LEM I (Торм)** на провід Л90 послідовно з датчиком гальмівного струму ДТ або шунтом амперметра.

Для вимірювання швидкості руху електропоїзда приєднати третій канал вимірювання напруги приладу NI cDAQ-9174 паралельно до виходів блоку вимірювання швидкості.

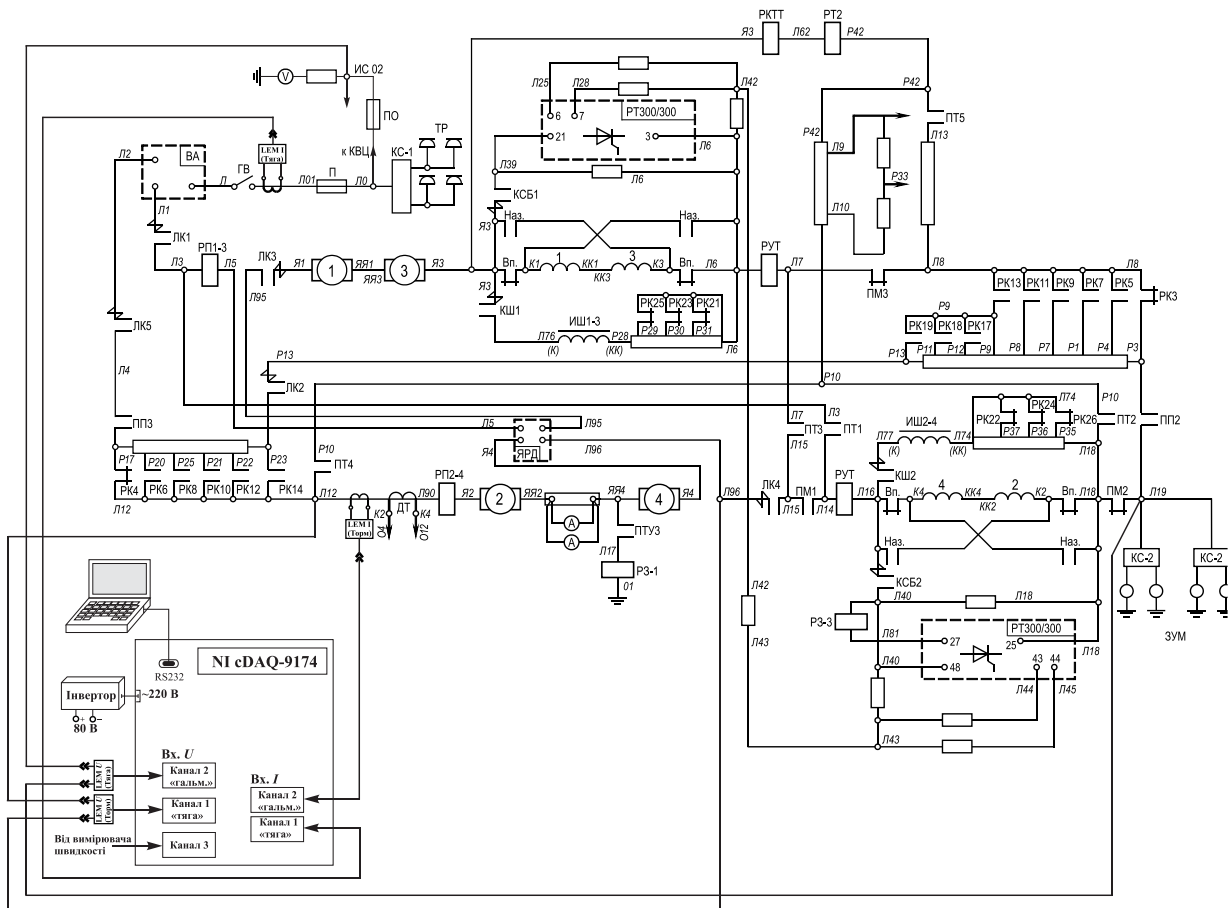


Рис 1. Схема підключення вимірювального комплексу NI cDAQ-9174 у вимірювальні кола вагона електропоїзда 81-714.5М (81-714.5М)

#### Основні технічні характеристики вимірювального комплексу NI cDAQ-9174

№ п/п	Найменування	Характеристика	Примітка
1	2	3	4
1	Входи напруги $U$	максимальна напруга 80 В; потужність < 0,35 Вт	допускається збільшення напруги до 15 % від номінальної
2	Входи струму $I$	номінальний струм 5 А; потужність < 0,15 Вт;	стійкість до перенавантаження: тривала – 10 А; на протягом 1 сек. – 250 А.
3	Клас точності	0,2	
4	Вага приладу	2,65 кг	
5	Розміри приладу	280 x 85 x 185 мм	

1	2	3	4
6	Датчик струму LEM	діапазон вимірів 30/300/3000 А; чутливість 100/10/1 мВ/А; точність при 25 °С ±1%; вага 1 кг	
7	Датчик напруги LEM	діапазон вимірів $U_{\text{ном}} 1500 \text{ В}$ , $U_{\text{max}} \pm 3750 \text{ В}$ ; чутливість 100/10/1 мВ/В; точність при 25 °С ±1%; вага 1 кг	

Підключення вимірювальних пристроїв здійснюється з додержанням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Дату та час проведення експерименту в межах узгоджених термінів визначає електродепо.

### Етап 3. Проведення експерименту

На ділянках між зупинками здійснюються різні режими руху і електричного гальмування електропоїзду що відповідають певним розмірам руху поїздів. Електричне гальмування для графікових зупинок використовується починаючи з наступних швидкостей:

- з 70 км/год на ділянці Вокзальна – Метробудівників, що відповідає графіку руху з інтервалом 4 хв.;
- з 65 км/год на ділянці Метробудівників – Металургів, що відповідає графіку руху з інтервалом 5 хв.;
- з 60 км/год на ділянці Металургів – Заводська, що відповідає графіку руху з інтервалом 6 хв.;
- з 55 км/год на ділянці Заводська – Проспект Свободи, що відповідає графіку руху з інтервалом 8 хв.;
- з 50 км/год на ділянці Проспект Свободи – Комунарівська, що відповідає графіку руху з інтервалом 10 хв.

Машиніст в процесі руху здійснює режим електричного гальмування з подальшою зупинкою на станціях згідно розробленого графіка.

В зворотному напрямку режим управління електропоїздом такий же.

Загальне керівництво експериментом здійснює представник ДПТУ.

На всьому протязі експерименту на електропоїзді реєструються струми, напруги відповідних ділянок силового кола, загальна витрата електроенергії на тягу та параметри руху поїзда (табл. 1) після обробки яких будуть розраховані інші показники.

Інтервал реєстрації вимірюваних величин в режимі тяги дослідного електропоїзду 0,1 с. При застосуванні електричного гальмування на електропоїзді вимірювальний комплекс NI cDAQ-9174 автоматично перемикається в режим запису параметрів з частотою дискретизації 100 Гц.

Таблиця 1

№ п/п	Параметр	Номінальне значення	Граничні значення	Показники якості електричної енергії
1	2	3	4	5
1.	Напруга на струмоприймачі електропоїзду, В	850	550...975	Усталене відхилення напруги; розмах зміни напруги; тривалість провалу напруги
2.	Струм вагону електропоїзду в режимі тяги, А		0..500	Пік-фактор, коефіцієнти форми та гармонік
3.	Напруга на групі двигунів в режимі електричного гальмування, В	850	550...975	—
4.	Струм групи електродвигунів вагону електропоїзду в режимі електричного гальмування, А		0..500	Пік-фактор, коефіцієнти форми та гармонік
5.	Швидкість руху електропоїзду, км/год		0...70	

#### Етап 4. Обробка отриманих результатів та надання висновків

Проводиться обробка даних, отриманих з вимірювального комплексу NI cDAQ-9174. В результаті вимірів за аналітичними виразами визначаються миттєві потужності вагону в режимі тяги та електричного гальмування, витрата та генерація електроенергії електропоїздом в залежності від режимів руху, коефіцієнт відновлення енергії, пік-фактори миттєвих потужностей та струмів, розмах коливання витрати та генерації електроенергії, коефіцієнти форми та гармонік миттєвих потужностей та струмів.

Оброблені дані аналізуються, визначаються їх імовірнісні характеристики та встановлюється зв'язок рівня генерованої енергії, показників її якості від параметрів гальмування та розмірів руху.

Відповідальні за проведення експерименту: головний технолог електродепо.

Експеримент проводять сумісно представники ДПТУ та електродепо.

Розроблено:

д.т.н., професор

В.Г.Кузнецов

к.т.н., доцент

О.І.Саблін

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

ДТГО «ЛЬВІВСЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби локомотивного господарства Львівської залізниці

  
М. Р. Хамевко



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник служби електропостачання Львівської залізниці

  
М. О. Фесик



Начальник служби приміських перевезень Львівської залізниці

  
В. З. Воронин



Проректор з наукової роботи ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна

  
С. В. Мямлін



**ПРОГРАМА**

експериментального дослідження режимів роботи системи тягового електропостачання при рекуперації електроенергії на ділянці Воловець-Лавочне

### Мета експерименту

Експериментальним шляхом дослідити вплив режимів рекуперації поїздів на зміну режимів роботи тягових підстанцій постійного струму з випрямного на інверторний та на рівень спотворення якості електричної енергії в первинній мережі.

Дослідити вплив режимів живлячої мережі 10 (35) кВ на ефективність роботи інверторів і рівень перетоків надлишкової електроенергії рекуперації при існуючих розмірах руху.

Розробити рекомендації щодо підвищення ефективності використання рекуперативної енергії.

**Підстава для проведення** – виконання держбюджетної НДР 23.00.15.16 «Наукові основи ефективного використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту», № ДР 0115U002311.

Програма передбачає наступні етапи проведення експерименту:

Етап 1. Отримання необхідної інформації по дослідній ділянці Воловець-Лавочне Львівської залізниці.

Етап 2. Організація експерименту

Етап 3. Проведення експерименту

Етап 4. Обробка отриманих результатів та розробка рекомендацій

### Умови проведення експерименту

3. Кліматичні умови

Суха, ясна погода. Температура навколишнього середовища – 10 ... + 40 °С.

4. Необхідні пристрої та прилади

№ п/п	Найменування	Кількість
1.	Портативний аналізатор якості електричної енергії	2
2.	Датчик змінного струму LEM-Flex	6
3.	Датчик постійного струму з опторозв'язкою	2
4.	Високовольтний резистор дільника напруги ДС Р3033	2
5.	Комплект радіопередачі даних Atmega128RFA1	3
6.	Портативний комп'ютер (ноутбук, нетбук)	3
7.	Акумулятори 12 В	3

\* до переліку не входять пристрої та з'єднувальні проводи, необхідні для підключення засобів вимірювальної техніки

### Етап 1. Отримання необхідної інформації по виділеній ділянці

№ п/п	Найменування	Причетні
1.	Однолінійна схема тягових підстанцій	ЕЧЕ
2.	Схема живлення та секціонування контактної мережі ділянки	ЕЧЦ
3.	Плановий графік руху поїздів, виконані графіки руху ділянкою	ЕЧЦ
4.	Режими споживання електроенергії за даними АСКОЕ	ЕЕЛ
5.	Паспортні дані силового обладнання тягових підстанцій, параметри контактної мережі ділянки, параметри системи зовнішнього електропостачання	ЕЧТ



## Етап 2. Організація експерименту

Вимірювання проводяться на тягових підстанціях, що обладнані інверторними агрегатами: ЕЧЕ Воловець, ЕЧЕ Скотарське Львівської залізниці та електровозі ВЛ11 чи електропоїзді ЕПЛ2Т.

ЕЧ Стрий Львівської залізниці відповідно з програмою готує місця проведення вимірів на дослідних тягових підстанціях. Вимірювання проводяться одночасно у вторинних колах ТН-35 кВ (ТН-10 кВ)

Схеми приєднання засобів вимірювальної техніки на тягових підстанціях наведені на рис. 1.

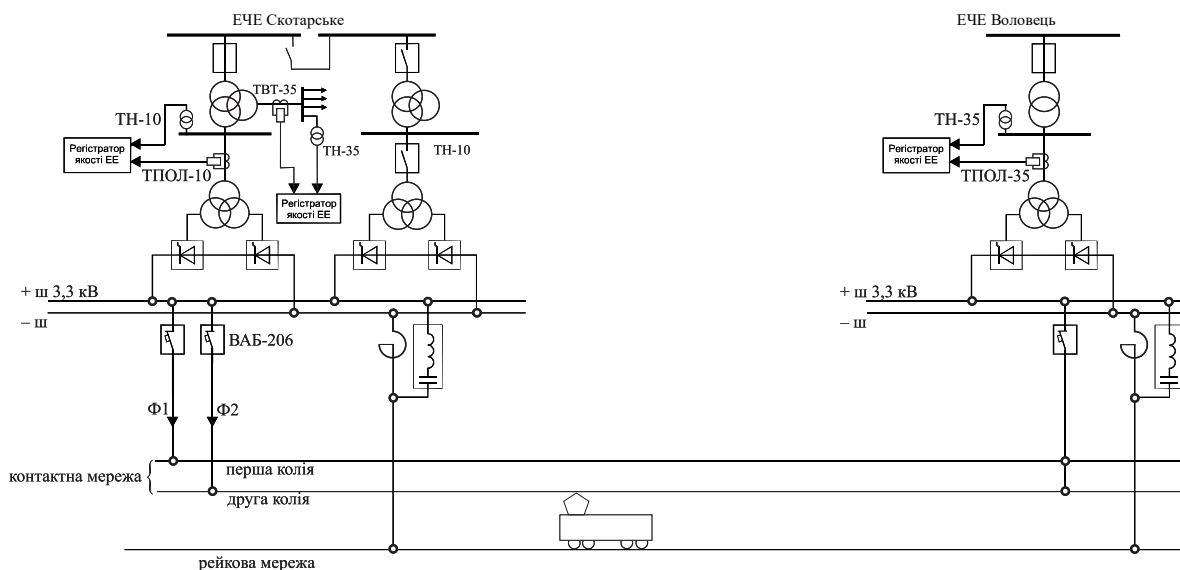


Рис. 1. Загальна схема підключення вимірювальних приладів на тягових підстанціях

Локомотивне депо Львів-Захід відповідно з програмою узгоджує проведення вимірювань та призначає відповідального фахівця для підключення вимірювальних приладів. При виконанні вимірювань в процесі руху дослідною ділянкою в неробочій кабіні електровозу чи салоні електропоїзду повинні знаходитись представники ДПТУ.

Вимірювання проводяться одночасно на двох суміжних тягових підстанціях і дослідному електровозі (електропоїзді), що слідує ділянкою із максимально можливим застосуванням рекуперативного гальмування з повноваговим поїздом (для електровозу) або за плановим графіком руху (для електропоїзду).

Локомотивне депо визначає електровоз (електропоїзд), що обладнаний лічильниками електроенергії тяги і рекуперації та готує його до експерименту. Для безперервного запису потрібних вимірюваних величин до кола підключення лічильників приєднуються вимірювальні пристрої, які являють собою аналогово-цифрові перетворювачі з бездротовою передачею даних.

Для вимірювання в колах електропоїзду виконується підключення чотирьох каналів:

- напруга в контактній мережі через дільник напруги (клема перед R27 – 3У);
- напруга в колі якорі тягових двигунів в режимі гальмування (клема перед R26 – 3У);
- струм загального шунта лічильника тяги (RS4);

- струм шунта амперметра кола якорів тягових двигунів (RS2).
- Для вимірювання в колах електровозу виконується підключення двох каналів:
- напруга в контактній мережі через дільник напруги (клемма перед R18 – 3У);
  - струм загального шунта лічильника тяги (Шн3).

Вимірювальна частина приладів розташовується у високовольтній камері, приєднується до елементів силового кола високовольтними ізолюваними проводами (напругою до 20 кВ). Вимірювання напруги виконується приєднанням дільників напруги на базі додаткового опору ДС Р3033 номінальною напругою 3 кВ зі встановленим на ньому АЦП та радіопередавачем. Вимірювання струму виконується ізолюваними датчиками з волоконно-оптичною гальванічною розв'язкою.

Підключення вимірювальних пристроїв до силових кіл електропоїзду виконується згідно схеми рис. 2, для електровозу – згідно схеми рис. 3.

Приєднання вимірювальних пристроїв до силового кола електрорухомого складу не потребує зміни її схеми.

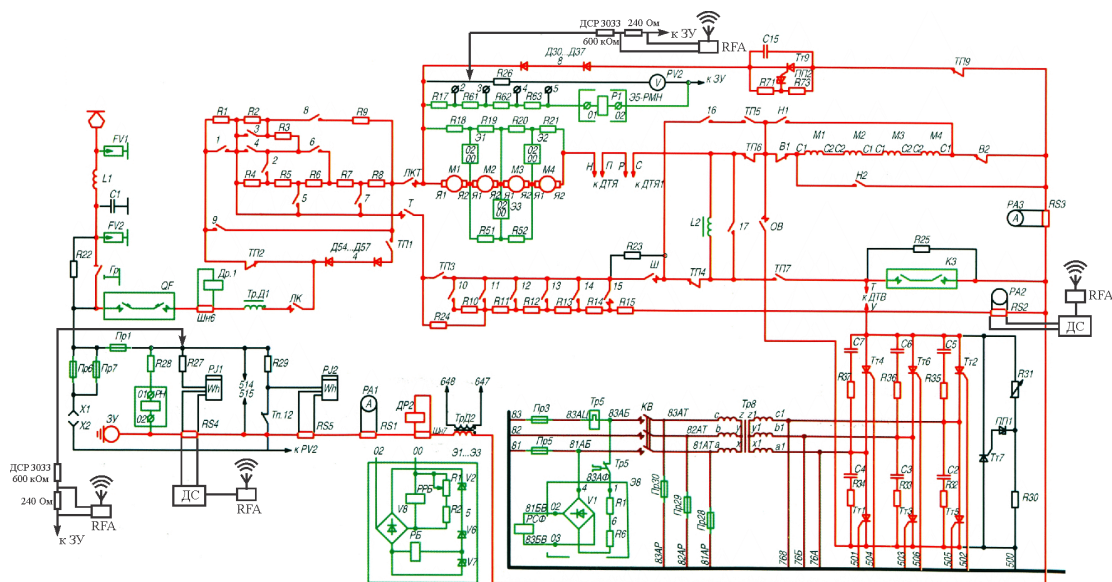


Рис. 2. Схема приєднання вимірювальних приладів до силових кіл електропоїзду ЕПЛ2Т

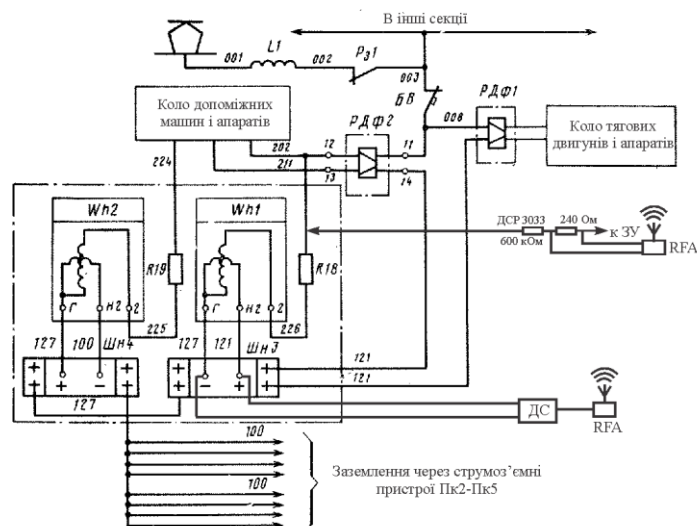


Рис. 3. Схема приєднання вимірювальних приладів до силових кіл електровозу ВЛ11

Для живлення аналізаторів, портативних комп'ютерів під час вимірювань необхідний доступ до мережі 220 В власних потреб на тягових підстанціях та кіл управління електровозу (електропоїзду) 50 В.

Основні технічні характеристики аналізатора «PNA 296»

№ п/п	Найменування	Характеристика	Примітка
1.	Входи напруги $U_A, U_B, U_C, U_N$	лінійна напруга 690 В; фазна напруга 500 В; повна потужність <0.35 ВА;	допускається збільшення напруги до 15 % від номінальної
2.	Входи струму $I_A, I_B, I_C, I_N$	номінальний струм 5 А; повна потужність <0.15 ВА;	стійкість до перенавантаження: тривала – 10 А; на протязі 1 сек. – 250 А.
3.	Клас точності	0,2	
4.	Вага приладу	2,65 кг	
5.	Розміри приладу	280 x 85 x 185 мм	
6.	Датчик струму LEM-Flex	діапазон вимірів 30/300/3000 А; чутливість 100/10/1 мВ/А; точність при 25 °С $\pm 1\%$	

Підключення вимірювальних пристроїв здійснюється з додержанням Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

Живлення регістраторів та аналізаторів під час експерименту здійснюється від власних потреб тягової підстанції та додаткових акумуляторів при вимірюванні в електровозі чи електропоїзді.

ДНУЗТ надає необхідні засоби вимірювальної техніки та з'єднувальні проводи. Для вимірювання також залучаються прилади служби електропостачання. Підключення вимірювальних приладів на тягових підстанціях виконують працівники РРД під контролем представника ДНУЗТ.

Оперативних перемикачів у схемі живлення пристроїв електропостачання для проведення експерименту на тягових підстанціях не вимагається. Схема живлення пристроїв електропостачання повинна відповідати нормально встановленій.

Дату та час проведення експерименту визначає служба електропостачання Львівської залізниці. Служба призначає відповідальних за проведення експерименту та інструктажі причетних.

Загальне керівництво проведенням вимірювань здійснює представник ДНУЗТ.

### Етап 3. Проведення експерименту

Вимірювання на тягових підстанціях Львівської залізниці та електровозі (електропоїзді) необхідно провести в нормальному режимі роботи протягом слідування дослідного електровозу (електропоїзду) у парному та непарному напрямках на ділянці Воловець – Скотарське.

Інтервал проведення вимірів – 1 с на всьому протягу експерименту.

На всьому протязі експерименту на підстанціях контролюються показники якості електроенергії, що споживається або генерується системою електричної тяги.

#### Етап 4. Обробка отриманих результатів

Проводиться обробка даних, зафіксованих реєстраторами та аналізаторами на тягових підстанціях та електровозі (електропоїзді).

Оброблені дані аналізуються, зіставляються, визначаються якісні та кількісні показники процесу рекуперації енергії.

Відповідальні за проведення експерименту – служба електропостачання, служба локомотивного господарства, кафедра електропостачання залізниць ДНУЗТ.

Експеримент проводять – представники кафедри електропостачання залізниць ДНУЗТ, представники дистанції електропостачання та локомотивного депо, обслуговуючий персонал тягової підстанції.

Розроблено: к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ О. І. Саблін  
к.т.н., доцент \_\_\_\_\_ Д. О. Босий  
інженер \_\_\_\_\_ Є. М. Косарєв

## ДОДАТОК Б

Автоматизована система прийняття рішень про розподіл надлишкової енергії рекуперації в системі електричного транспорту на основі нечіткої логіки

Програма може застосовуватись в системі електричного транспорту.

Рівень підготовки користувача повинен бути щонайменше користувач комп'ютера, але бажано щоб це був спеціаліст у системі електричного транспорту.

Програма призначена для розрахунку вихідних параметрів нечіткої моделі по вказаним вхідним у системі електричного транспорту.

Умови функціонування наступні:

- необхідний комп'ютер з встановленою ОС Windows, або Linux, або Mac OS;
- на комп'ютері повинен бути встановлений пакет Java Runtime Environment останньої версії;
- два файли нечіткої моделі \*.ftr та \*.ftl;
- щонайменше 40 Мб вільної оперативної пам'яті та 1 Мб простору на фізичному носії;
- монітор з роздільною здатністю не менше ніж 1024x768 точок, клавіатура, миша.

Вхідні дані наступні:

- нечітка модель у файлах формату \*.ftl та \*.ftr, створених за допомогою програми fuzzyTECH;
- значення заряду накопичувача енергії;
- значення напруги на тягу попутних поїздів;
- значення напруги на струмоприймачі рекуперуючого електрорухомого складу;
- значення напруги на шинах тягової підстанції;
- значення напруги на ввіді тягової підстанції (на шинах мережі живлення).

Вихідні дані наступні:

- значення частини струму рекуперації, що утилізується в гальмівних реостатах;
- значення частини струму рекуперації, яка корисно використана на тягу;

- значення частини струму рекуперації, що перетікає на суміжні міжпідстанційні зони до віддалених поїздів;
- значення частини струму рекуперації, що запасається в накопичувачах енергії;
- значення частини струму рекуперації, що перетікає в мережу живлення;
- вивід графіків по вхідним та вихідним даним моделі на форму;
- вивід тривимірної поверхні нечіткого виводу на форму;
- вивід історії розрахунків на форму, у тестовий файл або у документ Excel.

На рис. 2.4 зображена схема меню головної форми програми.

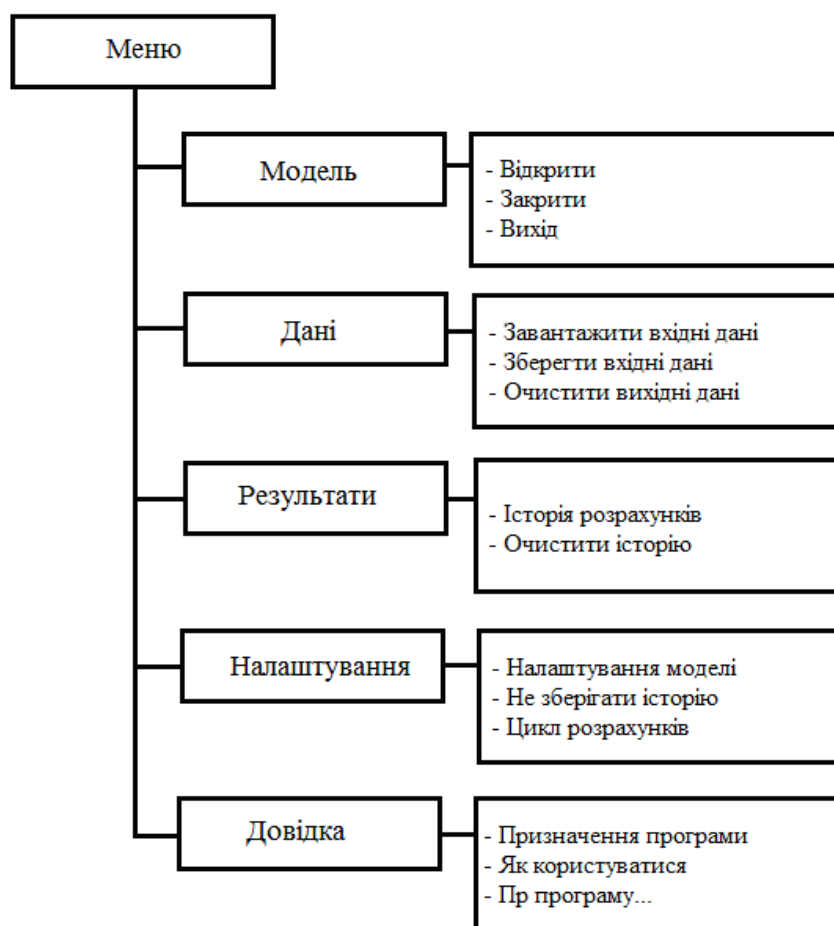


Рисунок 2.4 – Меню головної форми

На рис. 2.5 зображена схема меню форми історії розрахунків.

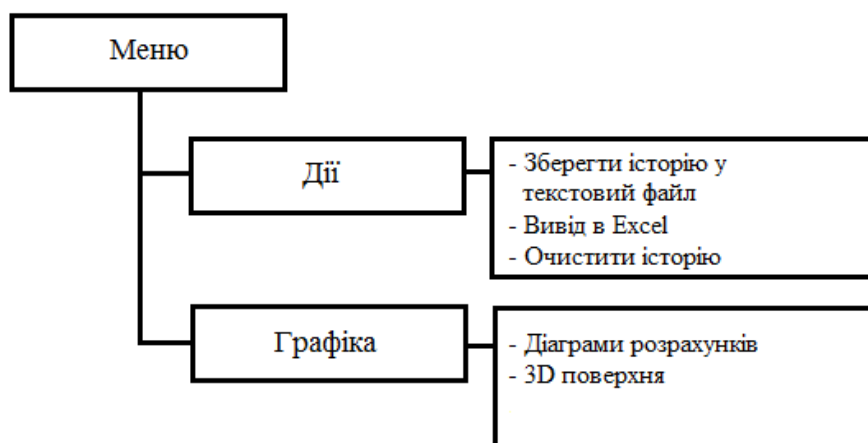


Рисунок 2.5 – Меню форми історії розрахунків

У табл. 2.2 описані всі пункти меню, які є у програмі.

Таблиця 2.2 – Пункти меню

Форма	Пункт	Опис	Можливості
Головна	Відкрити	Завантаження моделі	Завантажити модель
	Закрити	Закриття моделі	Закрити модель
	Вихід	Вихід з програми	Вихід з програми
	Завантажити вхідні дані	Завантаження вхідних даних	Завантажити вхідні дані з файлу замість ручного вводу
	Зберегти вхідні дані	Збереження вхідних даних у файл	Зберегти вхідні дані у файл
	Очистити вихідні дані	Очистка таблиці вихідних даних	Очистити таблицю вихідних параметрів
	Історія розрахунків	Перехід на форму історії розрахунків	Доступ до історії розрахунків
	Очистити історію	Очистка історії	Очистити історію
	Налаштування моделі	Перехід на форму налаштувань	Налаштувати модель
	Не зберігати історію	Радіокнопка	Вимкнути збереження історії розрахунків
	Цикл розрахунків	Радіокнопка	Вимкнути цикл розрахунків (розрахунки по одні ітерації)
	Призначення програми	Перехід на форму довідки	Перегляд довідки
	Як користуватися	Перехід на форму довідки	Перегляд довідки



	Про програму...	Перехід на форму довідки	Перегляд довідки
Історія розрахунків	Зберегти історію у текстовий файл	Збереження історії у текстовому файлі	Зберегти історію розрахунків у файл
	Вивід в Excel	Збереження історію у файлі формату *.xls	Зберегти історію розрахунків у файл формату *.xls
	Очистити історію	Очистка історії	Очистити історію
	Діаграми розрахунків	Побудова діаграм розрахунків	Побудувати діаграми розрахунків по обраним параметрами
	3D поверхня	Побудова тривимірної поверхні	Побудувати тривимірну поверхню по обраним параметрам

Перед запуском програми скопіюйте її на жорсткий диск комп'ютера. Після цього відкрийте каталог «Recovery», знайдіть файл «Recovery.jar» та запустіть, клікнувши два рази по ньому мишею. Після того як з'явиться головна форма для продовження роботи з програмою завантажте нечітку модель, яка зберігається форматах \*.ftr та \*.ftl.

Для перевірки працездатності виконайте наступні дії:

- запустіть програму (рис. 2.6);
- завантажте модель формату \*.ftr (рис. 2.7);
- заповніть перший рядок таблиці «Вхідні параметри» даними, які знаходяться у вказаному діапазоні (діапазон приведений у шапці таблиці для кожного параметра);
- натисніть на кнопку з двома круглими стрілками;
- вихідні дані порівняйте із вихідними даними, які розрахує програма fuzzyTECH на ті самі вхідні дані, і якщо вони не співпадають, то у середовищі fuzzyTECH натисніть Tools/Compile to/FTR... та вкажіть шлях до моделі \*.ftr, яка була завантажена у програму раніше, збережіть із заміною. Перезапустіть програму та виконайте всі дії знову.

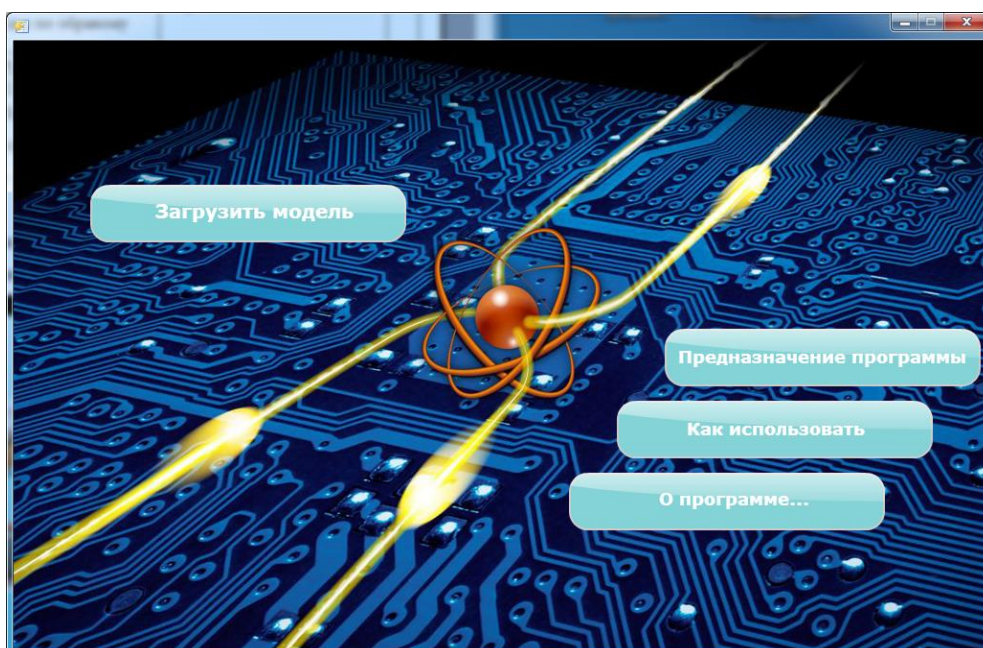


Рисунок 2.6 – Головна форма

Коли модель завантажена відкривається форма для розрахунків (рис. 2.7).

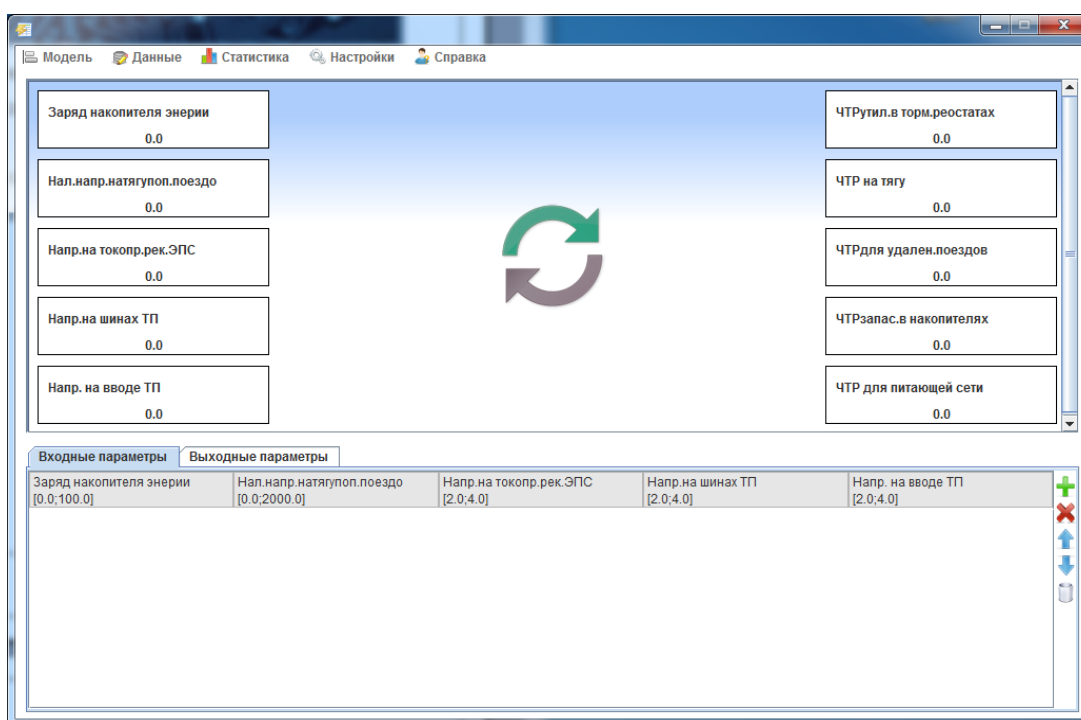


Рисунок 2.7 – Форма для розрахунків

Для виконання розрахунків необхідно провести наступні дії:

- відкрийте програму, вона знаходить у папці «Recovery», файл «Recovery.jar»;
- завантажте модель формату \*.ftr;

- завантажте або вручну заповніть таблицю вхідних параметрів;
- натисніть кнопку с двома круглими стрілками для початку обробки;
- перейдіть на вкладку таблиці з вихідними даними (рис. 2.8).

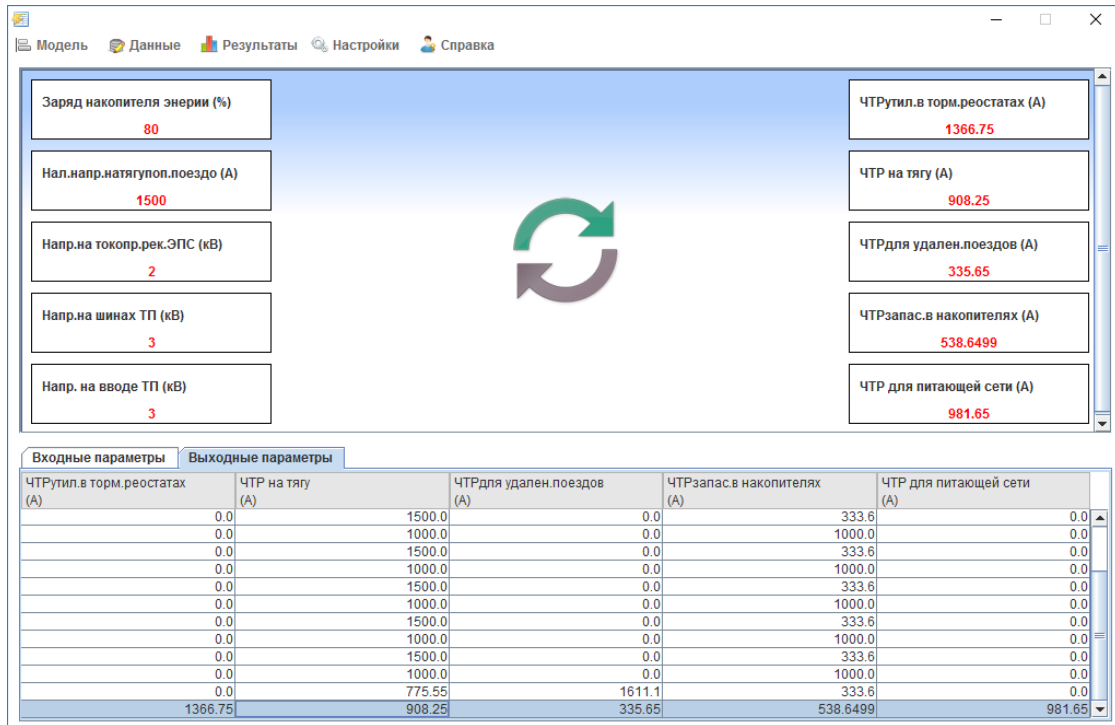


Рисунок 2.8 – Форма з результатами розрахунків

Для побудови графіків виконайте наступні дії:

- відкрийте програму, вона знаходить у папці «Recovery», файл «Recovery.jar»;
- завантажте модель формату \*.ftr;
- завантажте або вручну заповніть таблицю вхідних параметрів;
- натисніть кнопку с двома круглими стрілками для початку обробки;
- перейдіть в історію розрахунків (Статистика/Історія розрахунків);
- з пункту меню «Графіка» оберіть «Діаграми розрахунків»;
- у вікні, що відкрилось, поставте галочки біля параметрів, по яким треба побудувати графіки та натисніть кнопку «Побудувати».



Рисунок 2.9 – Форма «Діаграма розрахунків»

Для збереження отриманих результатів розрахунків необхідно:

- завантажте модель формату \*.ftg;
- завантажте або вручну заповніть таблицю вхідних параметрів;
- натисніть меню «Данные» - «Сохранить выходные данные»;
- у вікні вибору файлу вказати ім'я та необхідний формат збереження таблиці вихідних даних.

У табл. 2.3 приводяться повідомлення користувачу та програмісту про нештатні ситуації.

Для формування набору експертних рішень, на основі яких можливо обучити експертну систему створено спеціалізований програмний продукт «Автоматизоване робоче місце експерта з розподілу надлишкової енергії рекуперації в системі електричного транспорту. Керівництво користувача. Керівництво експерта», який входить до складу документації на програму, яка призначена для введення даних експерта про прийняття рішень з розподілу надлишкової енергії рекуперації в системі електричного транспорту.

Таблиця 2.3 – Повідомлення користувачу та програмісту

№	Текст повідомлення	Опис ситуації	Рекомендації
1	Під час завантаження вхідних даних виникла помилка	Дані не підходять до даної моделі	Впевнитись у правильності даних
2	Під час завантаження моделі виникла помилка	Не вірно обраний файл моделі	Впевнитись у правильності обраної моделі
3	Дані повинні бути дійсні або цілі числа	Були введені символні дані	Перевірити вхідні дані
4	Історія порожня	В історії немає даних	Виконати розрахунки аби в історію потрапили дані
5	Немає даних для побудови графіків. Істрія порожня	Немає даних для обробки	Виконати розрахунки аби в історію потрапили дані
6	Немає даних для збереження	Немає даних для збереження	Виконати розрахунки аби в історію потрапили дані
7	Немає даних	Таблиця вхідних даних порожня	Заповнити таблицю вхідних даних

В документі міститься опис програми та її функціональних можливостей. Програма реалізована у PhpStorm 2016 на фреймворку Yii2, створеного на мові PHP. Також використовувались такі мови та технології, як Vuejs, MySQL, JavaScript.

Система функціонує в будь-якому середовищі при умові наявності доступу до глобальної мережі Internet та браузеру.

Даний програмний продукт створено для побудови схем ділянок залізниці та моделювання ситуацій на них, щоб накопичувати рішення експерта для оптимальної рекуперації електроенергії щодо кожної окремої ситуації. Система дозволяє формувати робочі проекти та будувати ділянки залізниці схематично за введеною формулою, також надає можливість створення власних лексем для формул, за якими будуються схеми.

Система призначена для формування бази експертних рішень оптимальної рекуперації для сформованих ситуацій на залізничній ділянці. Вона містить модулі для завдання певної атрибутики для кожного елемента схеми, для формування груп елементів схем, також модуль збереження прийнятих рішень

Систему можливо використовувати на ОЦ залізниці для формування набору експертних рішень, на основі яких можна обучити експертну систему з прийняття рішень для оптимальної рекуперації електроенергії на залізничній ділянці.

Мінімальна конфігурація комп'ютера-клієнта для забезпечення роботи програмного продукту:

- IBM-сумісний комп'ютер з тактовою частотою не менш ніж 1.5 ГГц;
- оперативна пам'ять від 2 GB;
- вільний дисковий простір не менше 150 Мб;
- стандартні клавіатура та маніпулятор «миша»;
- підключення до мережі Інтернет зі швидкістю не менш ніж 64 кбіт/сек.

Вимоги до інформаційної та програмної сумісності комп'ютера-клієнта виражені вимогами до інтернет-браузеру:

- Internet Explorer версії 8.0 та вище;
- Google Chrome версії 4.3 та вище;
- Opera версії 11.0 та вище;
- Mozilla Firefox версії 9.0 та вище.
- Підтримка інших браузерів не гарантується.

Для того, щоб отримати доступ до функціоналу програми, незареєстрованому учаснику обговорень необхідно зареєструватись. Для реєстрації:

- 1) натисніть на пункті меню «Реєстрація», з'явиться форма, зображена на рис. 2.10;
- 2) заповніть всі реквізити;
- 3) натисніть кнопку «Реєстрація».

ДІТ Головна Реєстрація Увійти

Home / Реєстрація

## Реєстрація

Заповніть наступні поля:

**Логін**

Поле не може бути пустим

**email**

**Пароль**

[Зареєструватись](#)

Рисунок 2.10 – Форма реєстрації нового користувача

Для входу в систему натисніть пункт меню «Увійти», заповніть поля авторизації і натисніть кнопку «Увійти». Лише після авторизації можливо використовувати функціонал системи. Головна сторінка зображена на рис. 2.11.

ДІТ Головна Вийти ( зараз ви satiric )

Home / Проекти

## Проекти +

з 1 по 20 (Всього: 26)

#	ID	Назва	Створено	Останні зміни	Формула	Атрибути та схема	
1	39	Проект	2017-06-07 16:06:14	2017-08-29 04:08:10	є	є	
2	40	Зона рекуперации А	2017-06-08 11:06:04	2017-06-08 11:06:01	є	є	
3	41	Зона рекуперации 01	2017-06-10 05:06:00	2017-11-06 21:11:46	немає	є	
4	42	Новий проект	2017-06-10 07:06:12	2017-06-10 08:06:03	є	немає	
5	43	рг3	2017-06-10 08:06:36	2017-06-10 08:06:13	є	немає	
6	44	рг4	2017-06-10 08:06:09	2017-06-10 08:06:18	є	немає	
7	45	рг5	2017-06-10 08:06:12	2017-06-10 08:06:23	є	немає	

Рисунок 2.11 – Головна сторінка системи

На головній сторінці відображено історію проектів, тобто, всі проекти, створені користувачем. Для того, щоб створити новий проект:

- 1) натисніть «+» біля заголовку «Проекти», з'явиться форма, зображена на рис. 2.12;
- 2) заповніть назву проекту;
- 3) натисніть кнопку «Створити».

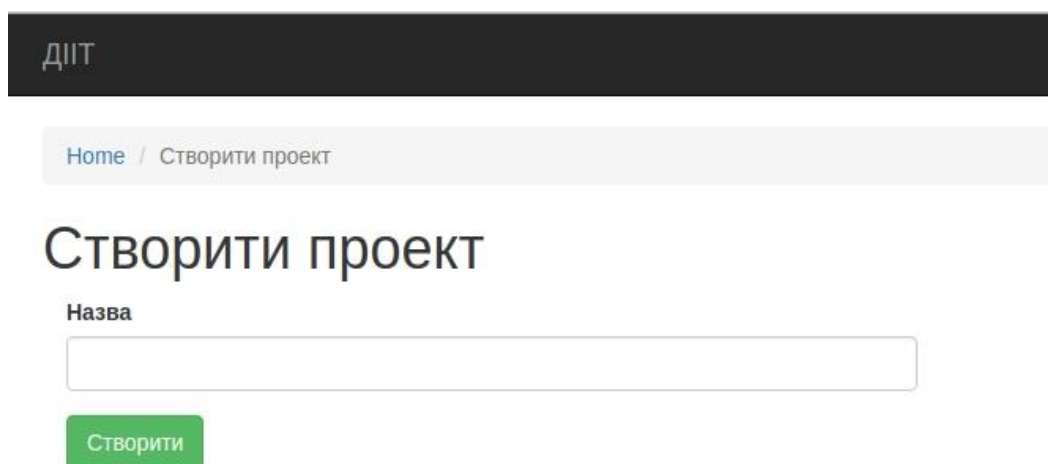


Рисунок 2.12 – Форма створення проекту

Для перегляду окремого проекту необхідно на головній сторінці натиснути кнопку з зображенням «Око». Для того, щоб змінити назву існуючого проекту, необхідно натиснути на кнопку з зображенням «Олівець». Щоб видалити існуючий проект, необхідно натиснути на кнопку з зображенням «Смітник» та підтвердити видалення проекту, натиснувши на «Ок» у діалоговому вікні.

Після створення проекту або натиснення на кнопку з зображенням «Око» на головній сторінці, буде відображена сторінка проекту, зображена на рис. 2.13.

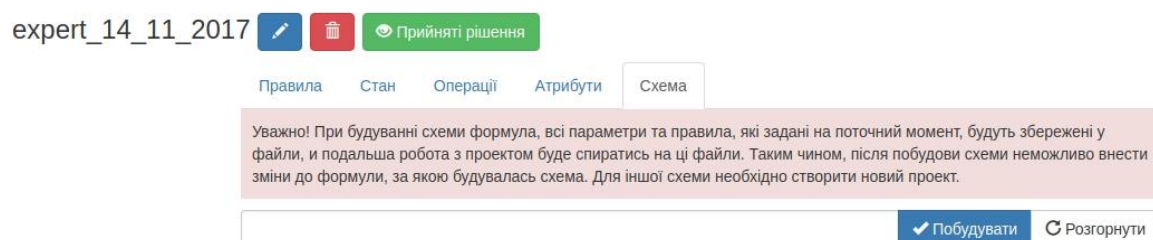


Рисунок 2.13 – Сторінка проекту

Сторінка проекту містить п'ять вкладок: «Правила», «Стан», «Операції», «Атрибути», «Схема». Для того, щоб побудувати схему:



- 1) введіть формулу, яка побудована з використанням алфавіту, який зазначено на вкладках «Правила» та «Операції»;
- 2) натисніть кнопку «Побудувати»;
- 3) розташуйте елементи так, як потрібно, перетаскуючи кожен з блоків, як зображено на прикладі рис. 2.14;
- 4) натисніть кнопку «Зберегти схему».

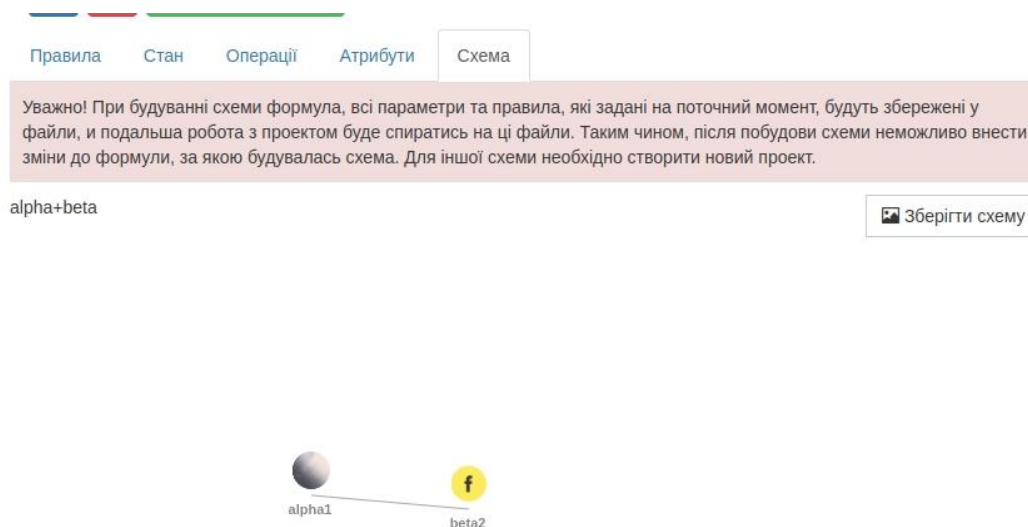


Рисунок 2.14 – Приклад побудови схемі

Після збереження схемі розпочнеться процес моделювання ситуацій на побудованій залізничній ділянці. Приклад зображено на рис. 2.15.

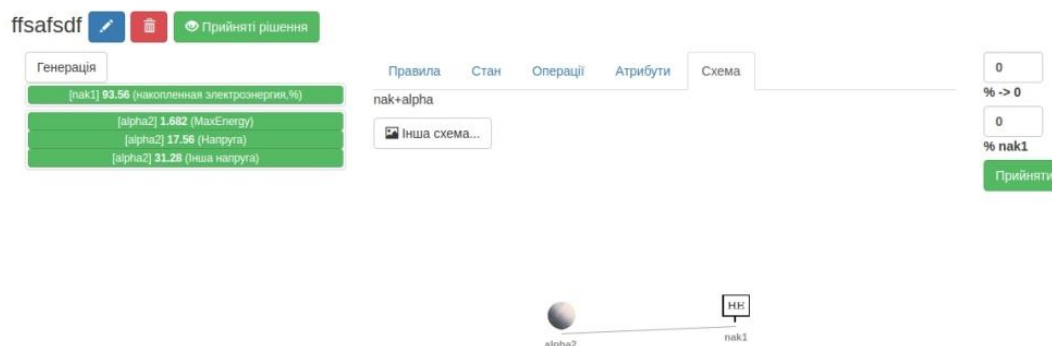


Рисунок 2.15 – Приклад процесу прийняття рішень

Ліворуч зображена панель з атрибутами для кожного елемента схеми. Вони відповідають параметрам цих елементів, наприклад, напруга, опір тощо. Значення для них було сформовано випадковим чином у межах мінімуму та максимуму, встановленого на вкладці атрибутів. Таким чином моделюється ситуація на залізничній ділянці. Праворуч зображено форму для введення прийнятого рішення для сформованої ситуації. Після прийняття рішення формується інша ситуація для тієї ж самої схеми.

Всі прийняті рішення зберігаються у форматі json, як зображено на рис. 2.16.

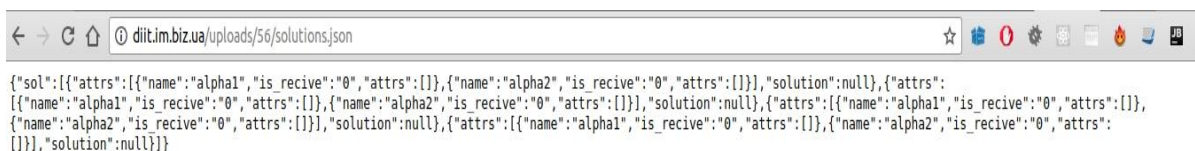





Рисунок 2.16 – Формат збереження рішень

Для додання своїх елементів до схеми слід додати нові правила. Сторінка керування правилами зображена на рис. 2.17. Щоб додати або змінити правило:

- 1) оберіть вкладку «Правила»;
- 2) користуючись кнопками «Плюс» та «Олівець», додайте або змініть існуюче правило. Уважно: після побудови схеми система працює з правилами, які існували на момент побудови, і зміна існуючих правил не вплине на інші проекти, у яких вже створена схема;
- 3) збережіть зміни.

Також для правил, які будуть перетворені на елемент схеми, можна обрати зображення, натиснувши на відповідну кнопку біля правила, для якого потрібно завантажити зображення. Щоб видалити правило, необхідно натиснути на червону кнопку «X».

Home / expert\_14\_11\_2017 [ id: 61; створено 2017-11-14 09:36:12 ]

expert\_14\_11\_2017   

Правила | Стан | Операції | Атрибути | Схема

Зауваження: при заповненні шансу остача розподілюється між іншими правилами, для яких не вказано шанс, порівну.  
Загальна верогідність дорівнює 100

Базове правило:























Літерал	Правила	Шанс	Приймач	Зображення	Керування
alpha	Правило	Шанс			
	alpha*(beta+alpha)	0	 		
	(beta+alpha)*(beta+alpha)	0	ні		  
	delta*gamma				 
beta	Правило	Шанс			
	beta:beta		 	ні	
	beta+beta		 		  
					

Рисунок 2.17 – Сторінка керування правилами

Для того щоб додати новий атрибут, необхідно перейти на вкладку «Атрибути». Приклад форми додання атрибутів зображено на рис. 2.18.

Home / expert\_14\_11\_2017 [ id: 61; створено 2017-11-14 09:36:12 ]

expert\_14\_11\_2017   

Правила | Стан | Операції | Атрибути | Схема







Літерал	Атрибути				Керування
alpha	Назва	Код	Мінімум	Максимум	
beta	Назва	Код	Мінімум	Максимум	
vjpr	Назва	Код	Мінімум	Максимум	

Рисунок 2.18 – Сторінка додання атрибутів

Для того, щоб подивитись всі можливі операції, натисніть на вкладку «Операції». Приклад списку всіх операцій зображено на рис. 2.19.

Home / expert\_14\_11\_2017 [ id: 61; створено 2017-11-14 09:36:12 ]

expert\_14\_11\_2017    Прийняті рішення

Правила **Стан** Операції Атрибути Схема

Операція	Опис	Позначення на схемі
+	Послідовне з'єднання	
:	Паралельне з'єднання	
*	Розгалуження	
(	-	-
)	-	-

Рисунок 2.19 – Список всіх операцій

Для того, щоб подивитись поточний стан системи, необхідно натиснути на вкладку «Стан». Приклад стану системи зображено на рис. 2.20.

Home / expert\_14\_11\_2017 [ id: 61; створено 2017-11-14 09:36:12 ]

expert\_14\_11\_2017    Прийняті рішення

Правила **Стан** Операції Атрибути Схема

```
{
  "_ents": {
    "alpha": {
      "rules": [
        "alpha*(beta+alpha)",
        "(beta+alpha)*(beta+alpha)",
        "delta*gamma"
      ]
    },
    "beta": {
      "rules": [
        "beta:beta",
        "beta+beta"
      ]
    },
    "vipr": {
      "rules": []
    },
    "inv": {
      "rules": []
    },
    "nak": {
      "rules": []
    }
  }
}
```

Рисунок 2.20 – Приклад стану системи

Для того, щоб вийти з системи, необхідно натиснути кнопку «Вихід» у навігаційній панелі праворуч.

Таблиця 2.4 – Повідомлення системи

Текст повідомлення	Опис ситуації	Рекомендовані дії
Зауваження: при заповненні шансу остача розподілюється між іншими правилами, для яких не вказано шанс порівну.	Відкрита сторінка проекту, вкладка Правила.	Проставити всі коефіцієнти, прийнявши повідомлення до уваги
Уважно! При будівництві схеми формула, всі параметри та правила, які задані на поточний момент, будуть збережені у файли.	Відкрита сторінка проекту, вкладка Схема.	Заповнити формулу, прийнявши повідомлення до уваги

Таким чином, розподіл надлишкової енергії рекуперації між накопичувачем, зовнішньою мережею та віддаленими тяговими навантаженнями на основі керування обладнанням за розробленим програмним засобом дозволяє забезпечувати допустимий рівень напруги на струмоприймачах та мінімізувати втрати енергії рекуперації транспортних засобів.

**ДОДАТОК В**

Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи



**КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО  
«ДНІПРОВСЬКИЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ»  
ДНІПРОВСЬКОЇ МІСЬКОЇ РАДИ**

юридична адреса: 49038, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 119 а;  
фактична адреса: 49064, м. Дніпро, просп. Сергія Нігояна, 49, тел./факс: (056) 373-92-00,  
E-mail: 7925960@i.ua, Код ЄДРПОУ 32616520

15.11.2017 № Е-11/1303

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_


**Акт**

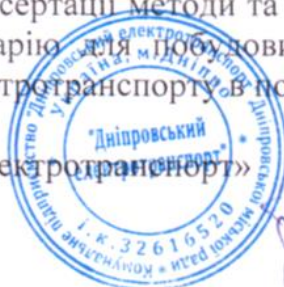
про впровадження результатів дисертаційної роботи Сабліна Олега Ігоровича  
«Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії  
рекуперації в системі електричного транспорту»

Цим підтверджуємо, що результати докторської дисертації Сабліна Олега Ігоровича на тему «Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту» прийняті до використання в Міському комунальному підприємстві «Дніпропетровський електротранспорт» та можуть бути використані при оновленні та модернізації інфраструктури господарства електропостачання міського електротранспорту при виборі параметрів накопичувачів і багатофункціональних перетворювачів енергії для тягових підстанцій.

Використання запропонованих способів управління енергозберігаючим обладнанням дозволяє мінімізувати надлишкову потужність обладнання за рахунок підвищення коефіцієнту завантаження до рівня 0,8...0,9, що зменшує капітальні витрати при модернізації існуючих та електрифікації нових ділянок міського електротранспорту та питомі витрати електроенергії на перевезення в межах 5...10 %.

Використання розробленого програмного комплексу по навчання експертної системи для управління розподілом надлишкової 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 інтелектуальних систем електропостачання міського електротранспорту в подальшому.

Головний інженер КП «Дніпровський електротранспорт»  В.М. Легкий



**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Заступник генерального директора  
з розвитку ТОВ «ДАК-ЕНЕРГЕТИКА»





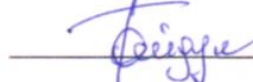
І. В. Доманський  
2018 р.

**Акт**

щодо використання результатів дисертаційної роботи Сабліна О. І. «**Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту**»

Комісія у складі начальника планово-виробничого відділу Апушкіна С. І., начальника відділу технічного контролю Резника Д. В., начальника сервісного відділу Гайдука В. О. підтверджує, що наступні результати докторської дисертації Сабліна Олега Ігоровича на тему «**Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту**» використано при розробці випрямно-інверторних перетворювачів тягових підстанцій та систем їх управління:

1. Експериментально визначений діапазон швидкості зміни напруги на шинах постійного струму тягових підстанцій, що дозволяє використовувати цю ознаку в якості параметра ідентифікації надлишкової енергії рекуперації в тяговій мережі та вибудовувати на ній систему управління інверторів, що зменшить кількість зривів рекуперативного гальмування.
2. Автоматизована система прийняття рішень про розподіл енергії рекуперації в тяговій мережі на основі нечіткої логіки, що є програмною частиною системи сумісного управління інверторами і накопичувачами енергії на тягових підстанціях, яка дозволяє забезпечувати стабілізацію вихідної потужності інверторів шляхом регулювання зарядно-розрядного режиму накопичувача. При цьому в систему зовнішнього електропостачання видається стабілізована складова енергії рекуперації, а змінна поглинається накопичувачем.

 С. І. Апушкін  
 Д. В. Резника  
 В. О. Гайдук



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Начальник відокремленого підрозділу  
«Служба електропостачання»,  
Регіональної філії «Львівська  
залізниця» ПАТ «Українська  
залізниця»



М. М. Пулін

2018 р.

#### Акт

впровадження результатів дисертаційної роботи Сабліна Олега Ігоровича  
«Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії  
рекуперації в системах електричного транспорту»

Цим підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Сабліна О.І. використовуються при налагодженні експлуатаційної роботи інверторних перетворювачів тягових підстанцій постійного струму в частині вибору уставок їх вмикання з урахуванням режимів напруги живлячої мережі.

Проведені автором дисертації дослідження використовуються з метою:

- поліпшення режимів напруги в тяговій мережі і на струмоприймачах електрорухомого складу при рекуперації на ділянках постійного струму;
- аналізу впливу схем живлення тягової мережі та режимів напруги на вводах тягових підстанцій на обсяги енергії рекуперації;
- оптимізації розподілу енергії рекуперації між суміжними тяговими підстанціями в режимі інвертування та зменшення транзитних і власних перетікань енергії.

Найбільшої уваги з отриманих в дисертації результатів заслуговують:

- Запропоновані алгоритми регулювання напруги на шинах тягових підстанцій постійного струму, що дозволяють збільшити обсяги рекуперації енергії в умовах зниження тягового електроспоживання при зменшенні розмірів руху на ділянках.

- Причини оптимізації місця розташування та параметрів накопичувальних пристроїв в системах тягового електропостачання.
- Метод оцінки потенціалу енергозбереження на електрифікованих ділянках при підвищенні ефективності споживання енергії рекуперації поїздів.

Розроблені в дисертації наукові методи підвищення ефективності використання енергії рекуперації в цілому є корисними при електрифікації нових і модернізації існуючих ділянок електричної тяги постійного струму.

Головний інженер служби  
електропостачання  
Львівської залізниці

О. І. Шалко

Начальник дорожньої  
електротехнічної лабораторії  
Львівської залізниці

А. І. Барна

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, д.т.н., професор

  
Б. Є. Боднар  
«12» 2018 р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
Сабліна Олега Ігоровича «Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперації в системі електричного транспорту»

Цей акт складено про те, що у навчальному процесі для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», який ведеться в університеті, прийняті до використання наукові та практичні результати, отримані в докторській дисертації Сабліна О. І.:

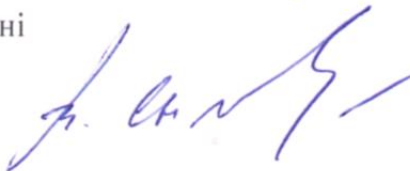
1. Математичне моделювання зони розподілу енергії рекуперації на основі математико-алгоритмічних конструкцій для побудови енергооптимальної структури системи тягового електропостачання, визначення параметрів, розташування та алгоритмів управління енергозберігаючим обладнанням (дисципліна «Електропостачання залізниць»).
2. Метод визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту для виконання техніко-економічної оцінки енергозберігаючих технологій при розв'язанні задач підвищення ефективності використання енергії рекуперації (дисципліна «Енергозбереження»).

Декан факультету «Управління енергетичними процесами»,  
д.т.н., професор



А. М. Афанасов

Завідувач кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання»,  
д.т.н. професор



В. Г. Сиченко

## ДОДАТОК Г

Список публікацій за темою дисертації та відомості  
про апробацію результатів дисертації

***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. Kebal, 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 // Гірнична 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 // Гірнична 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 «ХПІ». – 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. // Гірнична 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. // Гірнича 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 // Електромагнітна 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. Кузне-



- цов // 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 // «Энергосбережение 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» : тезиси 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» : тезиси 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. Саб-

- лін, В. Г. Кузнецов, М. О. Баб'як // «Оптимальне керування електроустановками» : тези доп. III Міжнародної науково-техн. конф. – Вінниця, 2015. – С. 11.
38. Саблін О. И. Распределение избыточной энергии рекуперации в системе электрического транспорта с применением нечеткого управления / О. И. Саблін, 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. Саблін // «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.

### **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» ОКЕУ» (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); ІХ 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.