

ФОНД ДЕРЖАВНОГО МАЙНА УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО «УКРАЇНСЬКИЙ НАУКОВО-
ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ ВАГОНБУДУВАННЯ
(ДП «УкрНДІВ»)

А.О. Сулим

***ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАТИВНОГО
ГАЛЬМУВАННЯ ПОЇЗДІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ
ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ БОРТОВИХ ЄМНІСНИХ
НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ***

Монографія

Кременчук 2023 р.

*Рекомендовано до друку науково-технічною радою
Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»
(протокол № 2 від 28.12.2022 р.)*

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. Фомін О.В.

д-р техн. наук, проф. Устенко О.В.

д-р техн. наук, проф. Мартинов І.Е.

Сулим А.О.

Підвищення ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування поїздів метрополітену шляхом впровадження бортових ємнісних накопичувачів енергії : монографія / А.О. Сулим. Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2023. 105 с.

ISBN 978-966-97716-8-1

Виконано оцінку заощаджень енергоресурсів на тяговому залізничному транспорті від впровадження накопичувачів енергії. Встановлено, що перспективним видом транспорту для впровадження накопичувачів енергії є рухомий склад метрополітену в силу особливостей його експлуатації. Наведено основні тенденції розвитку рухомого складу метрополітену в Україні. Окреслено маловивчені та актуальні проблемні питання за умов розміщення бортових накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену з системами рекуперативного гальмування. Обґрунтовано доцільність застосування бортових накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену. Досліджено умови протікання енергетичних процесів під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперативного гальмування. Виконано оцінку резервів заощаджень енергоресурсів у вітчизняному метрополітені за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування. Визначено найбільш вагомий фактор впливу на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії поїздом метрополітену. Запропоновано підходи з визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для рухомого складу метрополітену на підставі отриманих даних експериментальних досліджень та розробленого програмного забезпечення. Визначено параметри бортового ємнісного накопичувача енергії для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену. Запропоновано технічне рішення для ефективного накопичення та використання електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену. Розвинуто теорію створення енергоощадного рухомого складу метрополітену з системами рекуперативного гальмування, яка заснована на впровадженні бортового ємнісного накопичувача енергії як додаткового джерела живлення.

Монографія призначена для інженерно-технічних працівників, пов'язаних з теоретичними та експериментальними дослідженнями енергетичного тягового і гальмівного обладнання рухомого складу метрополітену, а також може бути корисною для студентів і аспірантів відповідних спеціальностей.

УДК 625.42:621.333.4

© Сулим А.О.

© ДП «УкрНДІВ», 2023

ISBN 978-966-97716-8-1

ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕДМОВА	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ. ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В МЕТРОПОЛІТЕНІ	5
1.1. Огляд наукової літератури щодо застосування накопичувачів енергії на рейковому тяговому залізничному транспорті та перспективи їх впровадження в метрополітені	5
1.2. Сучасний стан та основні тенденції розвитку рухомого складу метрополітену в Україні	9
1.3. Обґрунтування раціонального місця розташування накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення метрополітену	13
1.4. Аналіз технічних рішень щодо керування енергообмінними процесами між бортовим накопичувачем енергії та тяговим електроприводом	16
1.5. Постановка задач досліджень	19
Висновки за розділом 1	20
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ШТАТНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦІЇ	21
2.1. Розробка експериментального випробувального комплексу для дослідження енергообмінних процесів	21
2.2. Оцінка резервів заощаджень енергоресурсів у вітчизняному метрополітені за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування	23
2.3. Визначення найбільш вагомого фактору на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії	29
Висновки за розділом 2	32
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	33
3.1. Обґрунтування вибору ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації	33
3.2. Розробка підходів до визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії з використанням методів теорії імовірності	37
3.3. Визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії за критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення	42
3.4. Визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії з урахуванням маси та вартості системи накопичення	47
3.5. Аналіз результатів досліджень з визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії за розробленими підходами	53
Висновки за розділом 3	54
РОЗДІЛ 4. ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	55
4.1. Програмне забезпечення для моделювання руху складу метрополітену з системами рекуперації під час заданих режимів його ведення	55
4.2. Процедура визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену з використанням програмного забезпечення «Motion Simulation»	62
4.3. Розробка програмного забезпечення для визначення раціональних режимів ведення рухомого складу метрополітену на перегоні	72
4.4. Процедура визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії з використанням багатокритеріального методу оцінки та програмного забезпечення «Rational Trajectory»	80
4.5. Аналіз результатів досліджень з визначення раціональних параметрів ємнісних накопичувачів енергії за розробленими підходами з використанням програмного забезпечення	87
Висновки за розділом 4	88
РОЗДІЛ 5. СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ НА БАЗІ КОНДЕНСАТОРНИХ МОДУЛІВ	90
Висновки за розділом 5	92
ВИСНОВКИ	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	94

ПЕРЕДМОВА

В сучасних умовах господарювання та конкуренції з боку інших видів транспорту перед вітчизняними залізничними підприємствами гостро стоїть проблема постійного підвищення ефективності використання тягового рухомого складу. Технічний стан існуючого парку тягового рухомого складу залізничного транспорту залишає бажати кращого, оскільки його основу складають морально та фізично застарілі зразки, що робить очевидною необхідність його оновлення моделями нового покоління або проведення глибокої модернізації існуючих.

На сьогоднішній день значну перспективу подальшого розвитку має насамперед руханий склад метрополітену. Основними причинами цього є постійне розширення мереж та інфраструктури метрополітенів України і, як наслідок, створення передумов зростання попиту на закупку рухомого складу нового покоління. Крім того, в метрополітенах України станом на 2016 рік близько 35 % одиниць рухомого складу вичерпали свій ресурс і потребують проведення модернізації.

Відповідно до сучасних вимог, однією з ключових проблем під час оновлення рухомого складу є зменшення енергетичних витрат на тягу за рахунок впровадження на ньому енергозберігаючих технологій та енергоефективних систем. Тому подальший розвиток рухомого складу метрополітену, особливо в умовах постійного поетапного підвищення тарифів на електроенергію, неможливий без пошуку нових ефективних технічних рішень, які дозволять істотно знизити втрати електроенергії під час його експлуатації.

В останні роки, з метою скорочення споживання електроенергії на тягу, метрополітенами України поступово вводиться в експлуатацію новостворений та модернізований руханий склад. Головними відмінностями даного рухомого складу є впровадження енергозберігаючого обладнання, насамперед, системи рекуперації, мікропроцесорної системи управління, ефективного асинхронного тягового приводу.

Аналіз численних досліджень свідчить, що існує значний потенціал економії енергоресурсів та додаткового енергозбереження шляхом ефективного використання електроенергії рекуперації. За існуючої системи тягового енергозабезпечення метрополітену використання електроенергії рекуперації має імовірнісний характер та не перевищує 30 %. Отже, в даний час існує проблема реалізації отриманої надлишкової електроенергії та відсутня можливість її накопичення у разі відсутності споживачів в зоні рекуперації. Одним з основних шляхів розв'язання зазначеної проблеми є впровадження бортових ємнісних накопичувачів енергії.

Тому, розвиток наукових основ створення рухомого складу метрополітену з бортовими ємнісними накопичувачами енергії є важливою та актуальною науково-прикладною проблемою, результати розв'язання якої мають важливе значення як для вітчизняних, так і метрополітенів інших країн.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЯГОВОГО ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ. ОБГРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В МЕТРОПОЛІТЕНІ

1.1 Огляд наукової літератури щодо застосування накопичувачів енергії на рейковому тяговому залізничному транспорті та перспективи їх впровадження в метрополітені

Залізничний транспорт є однією з базових галузей економіки країни, яка має розгалужену залізничну мережу. Залізничний транспорт України забезпечує майже 82 % вантажних і 36 % пасажирських перевезень, здійснюваних всіма видами транспорту. Експлуатаційна залізнична мережа України складає майже 19,8 тис. км (без урахування окупованих територій, мережа яких на сьогодні не експлуатується), з яких понад 47,2 % електрифіковано. Залізнична мережа України є однією з найбільших у Європі, але рівень технічного розвитку системи вітчизняного залізничного транспорту нижчий за рівень розвинених країн. Цей факт загрожує вже не тільки виконанню залізничним транспортом соціально-економічних функцій, але й національній безпеці [1].

Світові тенденції розвитку залізничних транспортних систем свідчать про необхідність стрімкого об'єднання транспортних технологій та регіональних проектів мобільності. Залізничний транспорт стає більш енергозберігаючим та екологічним, безпечним щодо пасажирів та довкілля.

Однією з важливих проблем на залізничному транспорті України, яка потребує своєчасного вирішення, є підвищення енергетичної ефективності перевізного процесу. Це передусім, заощадження енергетичних ресурсів під час експлуатації тягового залізничного транспорту. Особливо актуальним останнім часом стає вирішення цієї проблеми у зв'язку з поетапним підвищенням вартості енергоносіїв протягом 2015-2021 років. Ще одним рушійним фактором необхідності прискореного вирішення зазначеної проблеми є відміна пільгових тарифів на електроенергію для залізничного транспорту України.

З аналізу літературних джерел [2–7] відомо, що основними заходами з підвищення ефективності використання електроенергії є наступні: коригування графіків руху поїздів, встановлення регуляторів напруг на шинах тягових підстанцій (ТП), обладнання ТП інверторами для реверсування електроенергії в зовнішню систему електропостачання, впровадження систем для пошуку раціональних режимів ведення поїздів за критерієм мінімального споживання електроенергії, впровадження систем накопичення енергії (СНЕ). З метою визначення переваг та недоліків застосування вищезазначених організаційних та технологічних заходів виконано їх порівняльний аналіз за наступними показниками: термін окупності заходу, кількість заощадженої електроенергії, обсяги робіт з впровадження. Обсяги робіт визначають за відношенням витрат ресурсів на вище зазначені заходи між собою. Результати порівняльного аналізу наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналіз заходів

Найменування заходу	Термін окупності заходу, років	Кількість заощадженої енергії від спожитої на тягу, %	Обсяг робіт з впровадження
Коригування графіку руху поїздів	Оцінити складно	≤ 7	Незначний
Встановлення регуляторів напруг на шинах ТП	4–8	4–5	Незначний
Обладнання ТП інверторами	7–15	8–15	Значний
Впровадження систем для пошуку раціональних режимів ведення	4–7	≤ 10	Незначний
Впровадження СНЕ	3–10	10–50	Середній

Результати аналізу для кожного з зазначених заходів наведено нижче.

Коригування графіків руху поїздів. Реалізувати використання електроенергії рекуперативного гальмування в повному обсязі шляхом оптимізації графіка руху поїздів неможливо [2–4]. Це пов'язано з тим, що для повного використання електроенергії на тягу графік руху поїздів має передбачати одночасне прибуття і відправлення поїздів на всі станції, за яких забезпечується збіг у часі споживання і рекуперації електроенергії. Однак частково підвищити ефективність використання електроенергії шляхом раціоналізації графіків руху поїздів можливо за рахунок меншого уповільнення під час гальмування. Проте такі режими приводять до зростання часу руху на перегоні та зменшення пропускної здатності. У разі впровадження раціональних графіків руху також виникають певні труднощі, пов'язані з організаційними питаннями. Перевагами кори-

гування графіків руху поїздів є незначні капіталовкладення та обсяги робіт з впровадження. До недоліків слід віднести незначну величину заощадженої енергії, проблему оцінки терміну окупності внаслідок впливу витрат, пов'язаних із зменшенням пропускної здатності, складність впровадження заходу.

Встановлення регуляторів напруг на шинах ТП. Одним з можливих заходів підвищення ефективності є розширення зони рекуперації шляхом регулювання напруги на шинах суміжних ТП. Однак перетікання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування на сусідні ТП супроводжуються збільшенням, на рівні (5–10) %, втрат енергії в тяговій мережі. З робіт [2–4] встановлено, що раціональна величина напруги на шинах ТП дозволить збільшити обсяги рекуперації енергії на 10 % і на 50 % зменшити кількість зривів рекуперативного гальмування, що в результаті дозволить заощадити споживання електроенергії на тягу на рівні (4–5) %. Перевагами заходу є порівняно незначний термін окупності та простота впровадження у порівнянні з іншими заходами, а недоліками – незначна кількість заощадженої енергії та значні втрати енергії в тяговій мережі під час її транспортування.

Обладнання ТП інверторами. Перевагою застосування інверторів є значна кількість заощадженої електроенергії у порівнянні з вищезазначеними заходами (на рівні (10–15) % електроенергії, що споживається на тягу поїздами). Але при цьому повернення енергії в первинну систему енергопостачання має ряд суттєвих недоліків [2–7]: 1) втрати енергії в тяговій мережі на рівні 10 %; 2) ускладнення обладнання ТП (встановлення інвертора, перетворювального трансформатора, реактора, системи керування, датчиків тощо); 3) енергія, що передається в первинну мережу має низьку якість; 4) погіршується режим живлення нетягових споживачів; 5) підвищується напруга в тяговій мережі; 6) значний термін окупності такого впровадження.

Впровадження систем для пошуку раціональних режимів ведення електрорухомого складу за критерієм мінімального споживання електроенергії з контактної мережі дозволить заощадити до 10 % електроенергії, що витрачається на тягу поїздів. Перевагою застосування цих систем є досить невеликий термін їх окупності та незначні обсяги робіт з впровадження. Як основний недолік слід відмітити незначну величину заощаджень електроенергії. До додаткових переваг слід віднести відсутність впливу на якість електроенергії в контактній мережі.

Впровадження СНЕ. За допомогою впровадження СНЕ можна додатково скоротити (10–50) % електроенергії, що витрачається на тягу поїздів [2–7]. Впровадження СНЕ передбачає використання реверсивного перетворювача, вимірювальних датчиків в колі накопичувача, системи керування і власне накопичувача. Недоліком заходу є потреба в суттєвих капіталовкладеннях, серед яких витрати на вищезазначене обладнання та його обслуговування. При цьому технологічно можливо розміщення СНЕ в різних місцях системи енергозабезпечення залізничного транспорту (на ТП, вздовж лінії контактної мережі, на поїзді). Перевагою розміщення систем на ТП та вздовж лінії контактної мережі є відсутність впливу на динамічні характеристики поїзда. Перевагою розміщення систем на поїзді є найбільша енергоефективність; відсутність впливу на якість електроенергії контактної мережі та термін служби її елементів (проводів, шин, тощо); можливість забезпечення автономного ведення поїзда під час виникнення аварійних режимів в системі енергозабезпечення залізничного транспорту.

За результатами узагальненого аналізу робіт [2–9] встановлено, що у порівнянні з іншими заходами впровадження СНЕ є найбільш перспективним та раціональним, оскільки дозволяє заощадити найбільший обсяг електроенергії, може мати найменший термін окупності за умов вибору раціонального технічного рішення та потребує проведення середнього обсягу робіт та змін у інфраструктурі системи енергозабезпечення. Тому метою подальших досліджень є розгляд питання щодо підвищення ефективності використання електроенергії на залізничному транспорті саме за рахунок впровадження СНЕ.

Основні тенденції розвитку тягового залізничного транспорту з накопичувачами енергії проаналізовано шляхом огляду значної кількості досліджень [10–162]. За результатами їх аналізу встановлено, що в розробку наукових основ створення тягового залізничного транспорту з накопичувачами енергії, значний вклад внесли колективи наукових та навчальних закладів країн СНД: Білоруського державного університету транспорту, Всеросійського науково-дослідного інституту залізничного транспорту, Державного університету інфраструктури та технологій, філії «Науково-дослідного та конструкторсько-технологічного інституту залізничного транспорту АТ «Укрзалізниця», Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Кременчуцького національного університету імені М. Остроградського, Московського державного університету шляхів сполучення, Московського енергетичного інституту, Науково-дослідного інституту енергозбереження на залізничному транспорті, Національного гірничого університету, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Новосибірського державного технічного університету, Омського державного університету шляхів сполучення, Петербурзького державного університету шляхів сполучення, Східноукраїнського національного університету імені В. Даля, Українського державного університету залізничного транспорту, Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова та підприємств: АТ «Укрзалізниця», ВАТ «Електропривод», ДП «Електротязмаш», ЗАТ «Елтон», ЗАТ «ЕСМА», ПАТ «КВБЗ», ТОВ «КМ Labs», фірми YUNASKO та інших.

В розробку наукових основ модернізації існуючого та створення нового автономного тягового залізничного транспорту з накопичувачами енергії, зокрема у розробленні систем для пуску двигунів, внесли вклад наступні відомі вчені: Азаренко В.О., Косов Є.Є., Корнев О.М., Лосев Є.П., Нікіпелій С.О., Носков В.М., Пасько О.В., Титова Т.С., Устенко О.В., Черняк Ю.В., Шаряков В.А. та інші [10–25].

Слід окремо виділити праці останнього періоду Володарця М.В., Гончарова О.М., Панасенка М.В., Пелепейченка В.І., Сергієнка М.І., Фалендиша А.П., дослідження в яких направлені на аналіз шляхів модернізації та створення гібридного залізничного транспорту (маневрових локомотивів ЧМЕЗ, дизель-поїздів ДЕЛ-02), а також на вибір раціональних параметрів енергетичної силової установки такого рухомого складу та оцінку ефективності застосування на ньому накопичувачів енергії [26–35].

Окремої уваги заслуговують дослідження Варакіна А.І., Варакіна І.М., Менухова В.В., Самітіна В.В., об'єктом яких є проектування та виготовлення накопичувачів енергії для різного типу транспорту, в першу чергу автомобільного та залізничного. Дослідження цих авторів представлені у вигляді статей, патентів та численних проектів на міжнародних виставках [36–40].

В розробку наукових основ модернізації та створення енергоефективного неавтономного тягового залізничного транспорту з накопичувачами енергії внесли вклад наступні вчені: Бичкова М.П., Бялобржеський О.В., Васильєв В.О., Денщиков К.К., Колб А.А., Логінова О.Ю., Охотніков М.С., Пупинін В.М., Родькін Д.Й., Хворост М.В., Щербак Я.В. та інші [41–68].

Представники Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» в своїх роботах приділяли увагу питанням оцінки енергоефективності та дослідження енергообмінних процесів в системах тягового енергозабезпечення електрифікованого залізничного транспорту з накопичувачами енергії. Професор Омеляненко В.І. та його послідовники (Любарський Б.Г., Овер'янова Л.В., Омеляненко Г.В., Рябов Є.С., Якунін Д.І.) присвятили значну кількість досліджень за напрямком використання накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення електрорухомого складу, зокрема приміських електропоїздів та поїздів метрополітену [69–80]. Праці зазначених дослідників останнього періоду спрямовані на створення приміського електропоїзда з бортовим електромеханічним накопичувачем енергії. В даних дослідженнях запропоновано технічне рішення ефективного управління енергообмінними процесами під час роботи тягового електропривода електропоїзда з бортовим накопичувачем енергії шляхом використання реверсивного перетворювача [73–78, 80]. Професор Жемеров Г.Г. в своїх роботах розглядав питання зменшення втрат енергії в системах електропостачання рухомого складу метрополітену у разі використання накопичувачів, зокрема під час її транспортування. Праці Жемерова Г.Г. останнього часу присвячені оцінюванню енергоефективності можливих систем енергопостачання рухомого складу метрополітену під час застосування накопичувачів енергії [81–85].

Представники Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка Лазаряна (професори Костін О.М., Артемчук В.В., Кузнецов В.Г., Муха А.М., доцент Саблін О.І.) в своїх дослідженнях приділяли значну увагу питанням щодо оцінки потенціалу заощаджень ресурсів, підвищення якості електроенергії в контактній мережі за рахунок використання накопичувачів енергії на неавтономному залізничному транспорті різного типу, а також визначенню параметрів накопичувача [86–97].

Значну кількість робіт підготовлено за участю професора Шевлюгіна М.В., який значну увагу приділяв проблемі підвищення енергоефективності неавтономного залізничного транспорту, насамперед метрополітену, за рахунок впровадження різного типу накопичувачів енергії (інерційних, електрохімічних, індуктивних, ємнісних) [98–104].

В теоретичних дослідженнях представників наукової школи професора Черемісіна В.Т. [105–111], як правило, приділено увагу проблемі підвищення ефективності неавтономного залізничного транспорту, насамперед магістральних електровозів, шляхом розміщення перспективних типів накопичувачів (ємнісних, зверх провідникових індуктивних, електромеханічних) в різних місцях системи тягового енергозабезпечення (на тягових підстанціях, на рухомому складі, на кінцях консольних ділянок).

Розробки вчених Штанга А.А., Щурова М.І., Улітіна В.Г. присвячені вирішенню питань щодо оцінки заощаджень енергетичних ресурсів на міському залізничному транспорті за рахунок впровадження різного типу накопичувачів енергії та розробки ефективних технічних рішень щодо керування процесами їх зарядження та розрядження [112–115].

Удосконаленню та створенню енергоефективних рудникових електровозів, в частині застосування на них комбінованих накопичувачів енергії та визначення їх необхідних параметрів, присвячені роботи таких вчених як Білозеров В.І., Сорін Л.Н., Степаненко В.П. [116–121].

Відомі також роботи дослідників Європи, Ізраїлю, Китаю, Кореї, США, Японії (Li X., Allègre A.-L., Rufer A., Barrero R., Sevilla M., Moninger F., Negishi H., Iannuzzi D., Tricoli P., Shimada M. et al.) в області підвищення ефективності використання залізничного транспорту шляхом застосування накопичувачів енергії [122–162]. У своїх дослідженнях іноземні вчені значну увагу приділяють наступним питанням щодо:

- оцінки резервів заощаджень ресурсів за рахунок різних місць розташування накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення залізничного транспорту [122–162];
- вибору раціонального типу накопичувача для різного виду залізничного транспорту [122, 126–130, 133–135, 137, 141–150, 152, 153, 156–160, 162];
- моделювання та дослідження енергообмінних процесів між накопичувачем, електроприводом рухомого складу та контактною мережею [123, 124, 126, 140–145, 147, 149–152, 155–157, 159, 161];
- розробки систем керування для пристроїв систем накопичення [123, 124, 126, 146–148, 150–152, 154, 157, 159];

– створення проектів з встановлення накопичувачів енергії на об'єктах інфраструктури та безпосередньо на залізничному рухомому складі [126, 147, 150, 151, 154, 156].

Огляд значної кількості наукової літератури свідчить, що під час створення інноваційного гібридного автономного та енергоефективного неавтономного залізничного транспорту доцільно передбачати застосування накопичувачів енергії. Під час експлуатації автономного залізничного транспорту з накопичувачами енергії економічний ефект в основному досягається шляхом зниження витрат палива за рахунок підвищення ефективності роботи енергетичної силової установки та покращення екологічних показників роботи силових установок за рахунок зменшення шкідливих викидів в навколишнє середовище (сажі, вуглецю тощо). Під час експлуатації неавтономного залізничного транспорту з накопичувачами енергії економічний ефект досягається шляхом підвищення енергоефективності та покращення енергозбереження за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування, зменшення встановленої потужності тягових підстанцій, стабілізації напруги контактної мережі, а також можливості забезпечення автономного ведення рухомого складу. Крім того, застосування накопичувачів енергії доцільне під час створення систем для запуску двигунів внутрішнього згорання автономного залізничного транспорту. Економічний ефект у разі впровадження зазначених систем досягається за рахунок зниження потужності та збільшення терміну служби акумуляторних батарей, можливості стабільного запуску двигуна за низьких температур навколишнього середовища, зменшення витрат на обслуговування. Таким чином, встановлено три основні напрямки досліджень тягового залізничного транспорту з накопичувачами енергії.

Одним з важливих питань, що розглядається і аналізується в зазначених роботах є оцінка потенціалу заощаджень ресурсів у разі використання накопичувачів енергії. Актуальність розгляду даного питання обумовлена необхідністю визначення доцільності застосування накопичувачів енергії. Результати узагальненого аналізу досліджень [10–162] щодо визначення потенціалу економії та поліпшення використання ресурсів у разі впровадження накопичувачів енергії на різних типах тягового залізничного транспорту, зображено на рис. 1.1–1.2. Оцінка потенціалу заощаджень ресурсів на автономному тяговому залізничному транспорті виконано на прикладі маневрового тепловоза ЧМЕЗ, дизель-поїзда ДЕЛ-02, дизель-поїзда VT642.

Маневрові тепловози	Дизель-поїзди	
		
<ul style="list-style-type: none"> ● Зниження витрат палива до 50 % ● Зниження викидів шкідливих речовин у 3-10 разів ● Зменшення потужності силової дизельної установки до 40 % 	<ul style="list-style-type: none"> ● Зниження витрат палива до 25 % ● Зниження викидів шкідливих речовин у 2-10 разів ● Зменшення потужності силової дизельної установки до 35 % 	<ul style="list-style-type: none"> ● Зниження витрат палива до 25 % ● Зниження викидів шкідливих речовин у декілька раз ● Зменшення рівня шуму під час експлуатації

Рис. 1.1 – Оцінка потенціалу заощаджень ресурсів на автономному тяговому залізничному транспорті

Електровози	Приміські електропоїзди	Рудникові електровози
 <ul style="list-style-type: none"> ● Скорочення витрат електроенергії на тягу до 12,9 % ● Підвищення тягових властивостей до 13 % ● Скорочення витрат електроенергії в тяговій мережі до 12,3 % 	 <ul style="list-style-type: none"> ● Скорочення витрат електроенергії на тягу до 30 % ● Зменшення встановленої потужності тягових підстанцій до 12 % 	 <ul style="list-style-type: none"> ● Скорочення витрат електроенергії на тягу до 30 % ● Зниження викидів шкідливих речовин не менше ніж в 3 рази (для дизельно-контактних електровозів)
 <ul style="list-style-type: none"> ● Скорочення витрат електроенергії на тягу до 50 % ● Зменшення встановленої потужності тягових підстанцій до 20 % 	 <ul style="list-style-type: none"> ● Скорочення витрат електроенергії на тягу до 30 % ● Зменшення встановленої потужності тягових підстанцій до 15 % 	

Рис. 1.2 – Оцінка потенціалу заощаджень ресурсів на неавтономному тяговому залізничному транспорті

Таким чином, за результатами аналізу оцінки потенціалу економії ресурсів на різних типах тягового залізничного транспорту встановлено наступне:

- значні перспективи впровадження накопичувачів має тяговий залізничний транспорт з різкозмінним навантаженням, зокрема електровози, приміські електропоїзди та дизель-поїзди, маневрові тепловози, кар’єрні рудникові електровози, трамваї, поїзди метрополітену;

- значно менші перспективи впровадження накопичувачів має тяговий залізничний транспорт далекого сполучення, який експлуатується в умовах руху з високими швидкостями та наявністю малої кількості зупинок на своєму шляху (пасажирські швидкісні локомотиви та електропоїзди далекого сполучення);

- найбільші перспективи впровадження накопичувачів енергії серед автономного транспорту мають маневрові тепловози завдяки умовам експлуатації: велика кількість пусків та гальмувань, розгонів та сповільнень, мала швидкість руху, значну частину часу займає робота на холостому ході;

- одним з найбільш перспективних видів транспорту для впровадження накопичувачів енергії є метрополітен в силу особливостей експлуатації його рухомого складу: стабільний графік руху у порівнянні з іншими видами залізничного транспорту; чітко виражений імпульсний характер навантаження; незначні відстані між перегонами, як наслідок, часті пуски та гальмування; часто змінюваний профіль колії; необхідність частого розгону та сповільнення внаслідок зміни обмежень швидкості для різних ділянок колії. Як наслідок, за рахунок зазначених умов експлуатації можливе значне зниження витрат на тягу (до 50 %) у порівнянні з іншими типами тягового неавтономного транспорту. Ще одним важливим фактором є стабільність виконання графіку руху, тобто існує можливість більш точного прогнозування техніко-економічного ефекту у порівнянні з іншим перспективним транспортом (наприклад, маневровим тепловозом).

За результатами аналізу досліджень [41–162] встановлено, що впровадження накопичувачів енергії в метрополітені дозволить вирішити комплекс задач, а саме:

- зменшити споживання електроенергії з мережі і знизити встановлену потужність силових установок, що здійснюють подачу та перетворення електроенергії (трансформаторів, перетворювачів, розподільчих підстанцій тощо) за рахунок збереження та повторного використання енергії рекуперативного гальмування;

- випрямити хвилинні та годинні графіки споживання електроенергії, внаслідок чого забезпечити статичну і динамічну стійкість енергосистеми;

- підвищити і стабілізувати рівень напруги в контактній мережі та струмоприймачах вагонів метрополітену, внаслідок чого збільшити пропускну здатність перегону;

- зменшити струмові навантаження та відповідно температуру нагріву силових агрегатів, що дозволить підвищити їх термін служби;

- підвищити якість електроенергії;

- підвищити безпечність процесу перевезення пасажирів під час виникнення аварійних режимів роботи в основних джерелах живлення;

- знизити теплові викиди в тунель, і відповідно, знизити витрати на вентиляцію і кондиціонування повітря, поліпшити клімат на станціях та в тунелях метрополітену, а також вагонах метрополітену.

Таким чином, подальші дослідження необхідно спрямувати на визначення ефективності впровадження накопичувачів енергії в метрополітені з метою зменшення споживання електроенергії з мережі і зниження встановленої потужності силових установок, що здійснюють транспортування та перетворення електроенергії.

1.2 Сучасний стан та основні тенденції розвитку рухомого складу метрополітену в Україні

Метрополітен є безпечним, надійним, екологічним та економічним транспортом, який забезпечує значну кількість пасажирських перевезень у містах-мегаполісах. Обсяги перевезень пасажирів вітчизняним метрополітеном постійно зростають та переважають у порівнянні з муніципальним транспортом (наприклад, в Києві близько 60 % від загального обсягу міських перевезень припадає на метрополітен) [163]. Тому, в Україні проблема подальшого розвитку метрополітенів залишається важливою в її практичній реалізації.

На даний час в Україні діє три метрополітени (Київський, Харківський, Дніпровський). Комунальне підприємство (КП) «Київський метрополітен» налічує 3 лінії та 53 станції, КП «Харківський метрополітен» – 3 лінії та 30 станцій, КП «Дніпровський метрополітен» – 1 лінію та 6 станцій. Загальна довжина діючих колій вітчизняних метрополітенів складає 116 км. В Україні цей вид транспорту щорічно перевозить приблизно 730 млн. пасажирів та має в експлуатації 1194 вагонів різних виробників [164].

Однак на сьогоднішній день стосовно метрополітену залишається достатньо невирішених питань. Перш за все, це питання розвитку та оновлення вагонів метрополітену, підвищення енергоефективності, покращення ресурсозбереження на рухомому складі.

Так, завдання Державної програми розвитку нового рухомого складу міського електротранспорту (Постанова КМУ № 992 від 01.07.1998 р.) та Державної програми будівництва і розвитку мережі метрополітенів на 2011-2020 рр. (Постанова КМУ № 1437-р від 12.07.2010 р.) виконані лише частково. Тому на даний

час питання розвитку та оновлення рухомого складу метрополітену є досить актуальним і потребує негайного вирішення.

На сьогоднішній день експлуатаційний парк вітчизняного метрополітену складається з вагонів моделей серії Є та їх модифікацій (Єж, Єж1, Єж3, Єм-501, Єма-502, Єм-508Т), а також вагонів моделей 81-714, 81-717, 81-718, 81-719, 81-714.5М, 81-717.5М, 81-540.2к, 81-541.2к, 81-540.3к, 81-541.3к, поїзд «Славутич» (вагони моделей 81-553.1, 81-554.1, 81-555.1), вагонів українського виробництва 81-7021, 81-7022, 81-7036, 81-7037, 81-7080, 81-7081, 81-7081-01, 81-710.1. Експлуатаційний парк КП «Київський метрополітен» налічує 823 вагони, КП «Харківський метрополітен» – 326 вагонів, КП «Дніпровський метрополітен» – 45 вагонів. Це передусім вагони моделей типу Є та їх модифікацій, а також вагони моделей 81.717/714, зі строком експлуатації понад 35 років, які обладнано двигунами постійного струму послідовного збудження з релейними системи керування. Такі вагони, що за технічними показниками значно поступаються сучасним інноваційним вагонам, є неекономічними та малоефективними [163, 164].

Вагони метрополітену моделей 81-717/714 (вагон моделі 81-717 – головний моторний вагон, вагон моделі 81-714 – проміжний моторний вагон) вважаються наступним етапом розвитку вагонів метрополітену серії Є та їх модифікацій. Зазначені вагони, на відміну від попередніх, замість літерного позначення серії отримали заводське номерне позначення: «81-717», «81-714», яке носить назву «модель».

Слід зазначити, що, не зважаючи на вище зазначені недоліки, вагони метрополітену серії Є та їх модифікацій, а також вагони моделей 81.714/717 добре себе зарекомендували в експлуатації. Навіть після 35-45 років експлуатації металокожуха їх кузовів мають в цілому задовільний технічний стан. Тріщини їх несних елементів практично відсутні, корозійні пошкодження незначні. Це надає підставу очікувати, що металокожуха кузовів таких вагонів може мати значний залишковий ресурс та можливість продовження терміну їх експлуатації.

Зазначені очікування були підтвержені результатами науково-експериментальних досліджень залишкового ресурсу металокожухи кузовів вагонів метрополітену серії Є та вагонів моделей 81-714/717, проведених фахівцями ДП «УкрНДІВ» у 2011 та у 2018 роках [165, 166]. За результатами вказаних досліджень було визначено, що металокожуха кузовів вагонів метрополітену серії Є та їх модифікацій, що знаходяться в експлуатації більше ніж 45 років та вагони моделей 81-714/717, що експлуатуються в умовах КП «Київський метрополітен» майже 40 років, мають залишковий ресурс від 20 до 22 років відповідно. Отримані результати досліджень стали підставою для прийняття рішень про модернізацію з продовженням строку експлуатації вагонів метрополітену серії Є та їх модифікацій та вагонів моделей 81-714/717 інвентарного парку КП «Київський метрополітен». Загальний вигляд поїздів, які складаються з вагонів моделей серії Є та 81-714/717 зображено на рис. 1.3, 1.4.



Рис. 1.3 – Загальний вигляд поїзда, який складається з вагонів серії Є



Рис. 1.4 – Загальний вигляд поїзда, що складається з вагонів моделей 81-714/717

Вищезазначене свідчить про те, що на даний час в Україні мають право на існування два напрямки оновлення рухомого складу метрополітенів:

- придбання нових вагонів на зміну морально та фізично застарілих;
- продовження терміну експлуатації існуючих вагонів метрополітену серії Є та їх модифікацій, а також вагонів моделей 81.717/714.

В останні роки, з метою скорочення споживання електроенергії на тягу та покращення ресурсозбереження, до парку метрополітенів України поступово вводиться в експлуатацію як новостворений, так і модернізований рухомий склад.

У 2004 році в КП «Київський метрополітен» було введено в експлуатацію перший поїзд з асинхронним тяговим електроприводом, мікропроцесорною системою управління та можливістю реалізації рекуперативного гальмування, який отримав назву «Славутич». У порівнянні з вагонами моделей 81-717/714 вагони поїзда «Славутич» мають збільшену потужність тягових двигунів з 110 кВт до 170 кВт, на 30 % знижено енергоспоживання. За рахунок застосування асинхронних електродвигунів і транзисторного силового обладнання забезпечується більш висока надійність вагонів, зменшення витрат на 20 % на техобслуговування і

ремонт, збільшення термінів служби і міжремонтних пробігів двигунів та іншого обладнання, більш плавний хід та менший рівень шуму. Поїзд створений АТЗТ «Вагонмаш», за тісного співробітництва з холдинговою компанією «Група Дедал», підприємствами «Шкода ДТ» і «УніКонтролз» (Чехія) та КП «Київський метрополітен». Поїзд складається з вагонів трьох типів: 81-553 – головний моторний вагон; 81-554 – проміжний моторний вагон; 81-555 проміжний причіпний вагон. Поїзд «Славутич» існує лише в одному екземплярі в КП «Київський метрополітен» та на даний час не експлуатується. Загальний вигляд поїзда «Славутич» зображено на рис. 1.5.



Рис. 1.5 – Загальний вигляд поїзда «Славутич»

У 2005 році флагманом вітчизняного вагонобудування – ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (далі – ПАТ «КВБЗ») у тісній співпраці з КП «Київський метрополітен» вперше були розроблені вітчизняні вагони метрополітену-та розпочато їх виробництво. Результатом плідної співпраці ПАТ «КВБЗ», КП «Київський метрополітен», ДП «УкрНДІВ» та інших організацій стало введення в експлуатацію у 2010 році першого вітчизняного поїзда метрополітену. Зовнішній вигляд цього першого поїзда метрополітену, що складається з нових вагонів моделей 81-7021 і 81-7022, зображено на рисунку 1.6. На даний час на Сирецько-Печерській лінії експлуатуються 30 вагонів цих моделей.



Рис. 1.6 – Загальний вигляд поїзда, що складається з вагонів моделей 81-7021 та 81-7022

При цьому основними перевагами вагонів вітчизняного виробництва є наступні:

- обладнання кабіни машиніста кондиціонером;
- використання сучасних комплектуючих та агрегатів в системі керування поїздом;
- обладнання підвагонного устаткування сучасною протипожежною системою «Гла»;
- застосування більш сучасної конструкції притульно-зсувних дверей пасажирських салонів, які окрім захисту від пилу та вологи забезпечують підвищену шумоізоляцію;
- застосування вікон з вакуумних склопакетів – для надійної та ефективної тепло- і звукоізоляції пасажирських салонів;
- обладнання пасажирських салонів системою примусової вентиляції;

- використання більш ергономічних конструкцій поручнів, з оптимальним їх розміщенням в пасажирському салоні;
- передбачення місць для розташування пасажирів в інвалідних колясках у головних вагонах;
- пасажирські крісла мають ергономічну конструкцію та виконані в антивандальному варіанті, а їх розміщення та кріплення забезпечують зручність під час обслуговування та прибирання вагонів;
- фарбування вагонів двокомпонентними акрил-поліуретановими фарбами, що, окрім захисту кузова від корозії, надає вагонам привабливого та сучасного вигляду;
- використання в конструкції вагонів неметалевих матеріалів, що мають всі необхідні пожежні та гігієнічні сертифікати.

У 2010 році ПАТ «КВБЗ» були виготовлені перші дослідно-промислові зразки трьох вітчизняних вагонів метрополітену з асинхронним тяговим приводом та мікропроцесорною системою управління, з можливістю реалізації режиму рекуперативного гальмування (головний вагон поїзда – 81-7036, проміжний – 81-7037). За результатами проведених приймальних випробувань членами приймальної комісії прийнято рішення щодо можливості серійного виробництва зазначених моделей вагонів. З 2015 року новостворений вітчизняний поїзд експлуатується в КП «Харківський метрополітен». Загальний вигляд першого вітчизняного поїзда з асинхронним тяговим приводом, зображено на рисунку 1.7.

У 2010 році КП «Київський метрополітен» введено в експлуатацію поїзда, що складаються з вагонів моделей 81-540.2к/81-714.5М, виробництва АТЗТ «Вагонмаш» та ВАТ «Метровагонмаш» (м. Санкт-Петербург, м. Митищі, Російська Федерація). Вагони цих поїздів мають сучасний інтер'єр та екстер'єр, однак обладнані тяговими двигунами постійного струму типу ЕДМ-114 потужністю 110 кВт та релейною системою управління, які є малоефективними. Загальний вигляд поїзда, який складається з вагонів моделей 81-540.2к/81-714.5М виробництва АТЗТ «Вагонмаш» та ВАТ «Метровагонмаш», наведено на рисунку 1.8.



Рис. 1.7 – Загальний вигляд поїзда, що складається з вагонів моделей 81-7036, 81-7037



Рис. 1.8 – Загальний вигляд поїзда, що складається з вагонів моделей типу 81-540.2к/81-714.5М

У 2013 році розпочато роботи з комплексної модернізації вагонів типу Є та їх модифікації шляхом заміни тягових двигунів постійного струму на асинхронний тяговий електропривод. Роботи було виконано ПАТ «КВБЗ», за участі як вітчизняних так і іноземних компаній (ITOCHU, KNORR-BREMSE, Fuji-Electric, Mitsubishi electric Co., Хартрон-Експрес ЛТД та інших). На даний час в КП «Київський метрополітен» за цим проектом експлуатується 135 модернізованих вагонів. Загальний вигляд модернізованих поїздів наведено на рисунку 1.9.



Рис. 1.9 – Загальний вигляд поїздів, що складаються з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01

У 2016 році в КП «Харківський метрополітен» розпочато роботи з модернізації експлуатованих вагонів типу Є. В ході модернізації виконано заміну електрообладнання, однак замість асинхронного приводу встановлено колекторні тягові двигуни без можливості рекуперації енергії в контактну мережу. Модернізовані вагони отримали номер моделі 81-710.1 (як головні, так і проміжні). У 2017 році поїзд розпочав експлуатацію з пасажирами. Загальний вигляд поїзда, який складається з вагонів моделей 81-710.1, зображено на рисунку 1.10.



Рис. 1.10 – Загальний вигляд поїздів, що складаються з вагонів моделі 81-710.1

Головними відмінностями розглянутого рухомого складу (рис. 1.5–1.10) є покращений інтер'єр та екстер'єр, впровадження на ньому енергозберігаючого обладнання, створення умов для перевезення осіб з особливими потребами. Перевагами новоствореного та модернізованого рухомого складу з асинхронним приводом (рис. 1.5, 1.7, 1.9) є скорочення витрат електричної енергії на тягу, зменшення обсягів викидів парникових газів, підвищення плавності руху поїздів, підвищення надійності роботи електричного обладнання вагонів і зменшення обсягів необхідних регламентних робіт та технічного обслуговування. За результатами досліджень [158, 167, 168] відомо, що впровадження асинхронного електроприводу, мікропроцесорних систем управління та систем рекуперації на рухомому складі метрополітену дозволяє скоротити до 40 % електроенергії, що витрачається на тягу, а також в цілому зменшити енергоспоживання в метрополітені на 5-8 %. В цілому, за останні роки комунальними підприємствами України оновлено не більше ніж 15 % парку вагонів метрополітену, що є недостатнім і роботи в цьому напрямку мають бути продовжені [163, 164].

Основні напрямки і заходи щодо подальшого розвитку та вдосконалення рухомого складу метрополітену проаналізовано шляхом огляду низки як вітчизняних так і іноземних досліджень [41-169]. Узагальнений аналіз існуючого стану парку рухомого складу вітчизняного метрополітену та основні напрямки його розвитку і оновлення дозволили встановити наступне:

- оновлення парку вагонів метрополітену в Україні здійснюється за двома напрямками: придбання нових вагонів та модернізація існуючих вагонів з одночасним продовженням строку експлуатації;
- вітчизняна промисловість має можливості щодо оновлення парку вагонів метрополітену в країні та виготовлення сучасних інноваційних моделей вагонів метрополітену, які не поступаються світовим аналогам;
- зміни в конструкції новостворених та модернізованих вагонів метрополітену спрямовані на покращення їх енергоефективності, комфорту для пасажирів і машиністів, збільшення естетичної привабливості вагонів, зменшення витрат на експлуатацію і технічне обслуговування, а також створення умов для користування рухомим складом особам з обмеженою мобільністю;
- основними напрямками подальшого розвитку та вдосконалення рухомого складу метрополітену є підвищення безпеки руху і зниження споживання електроенергії шляхом впровадження енергозберігаючих та інформаційних технологій, застосування сучасних композитних матеріалів. Одним з основних заходів зниження споживання електроенергії поїздами метрополітену є ефективне використання електроенергії рекуперативного гальмування шляхом впровадження накопичувачів енергії.

1.3 Обґрунтування раціонального місця розташування накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення метрополітену

Ефективність використання електроенергії рекуперативного гальмування, в свою чергу, в значній мірі залежить від вибору місця розташування накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення метрополітену. Отже, аналіз питання обґрунтування раціонального місця розташування накопичувачів енергії в системі енергозабезпечення метрополітену є досить важливим та потребує детального вивчення, тому далі в роботі розгля-

нуто можливі варіанти місць розташування накопичувачів енергії та виконано їх порівняльний аналіз за різними показниками.

З аналізу електричних принципових схем та існуючих досліджень [6, 98, 106, 107, 112, 114, 170] відомо, що в метрополітені накопичувачі енергії можливо розташовувати: перед тяговою підстанцією, безпосередньо на тяговій підстанції, на постах секціонування, на виході тягової підстанції вздовж лінії контактної мережі (на станціях, на кінцях консольних ділянок тягової мережі), безпосередньо на рухомому складі. Структурну схему системи енергозабезпечення метрополітену з можливими місцями розташування накопичувачів енергії зображено на рис. 1.11.

В структурній схемі (рис. 1.11) прийнято наступний перелік умовних позначень: ТЕС – теплоелектростанція; ЛЕП – лінія електропередач; РП – районна підстанція; ПС – пост секціонування; НЕ – накопичувач енергії; ТП – тягова підстанція; РС – рухомий склад; КР – контактна рейка; ХК – ходова колія.

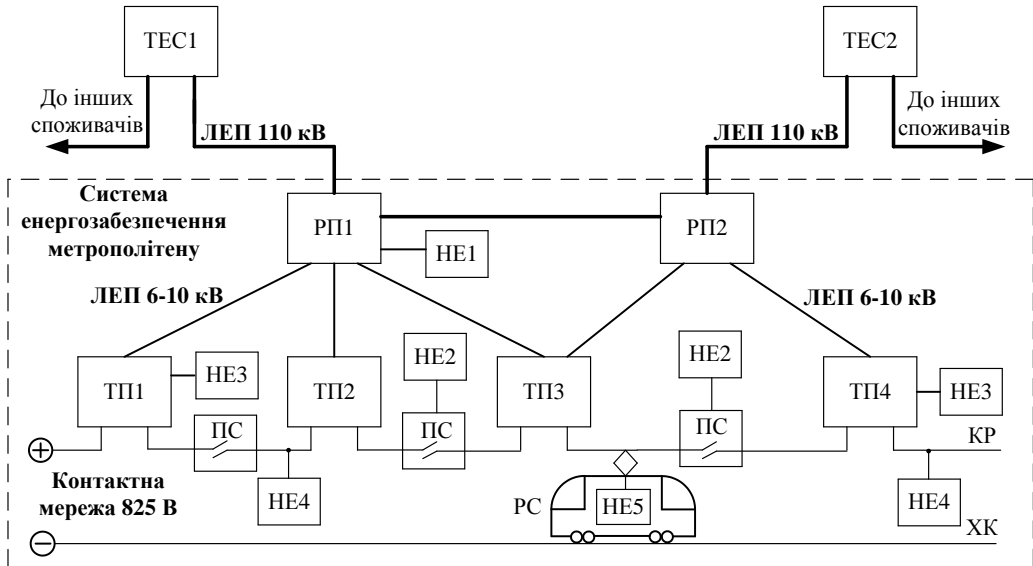


Рис. 1.11 – Структурна схема системи енергозабезпечення метрополітену з можливими місцями розташування накопичувачів енергії

Порівняльний аналіз щодо визначення раціонального місця розташування запропоновано здійснювати за наступними показниками: енергоефективність, капіталовкладення, економічність, вплив на якість електроенергії контактної мережі, забезпечення підвищення пропускної здатності перегону, вплив на строк служби елементів системи енергозабезпечення метрополітену, можливість забезпечення автономного ведення рухомого складу під час виникнення аварійних режимів в системі енергозабезпечення метрополітену, вплив на характеристики розгону і гальмування поїзда, здійснення керування енергопроцесами. Результати порівняльного аналізу різних варіантів місць розташування накопичувачів енергії за вищезазначеними показниками, наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз накопичувачів енергії за місцем їх розташування

Назва показника	Місця розміщення накопичувачів енергії				
	НЕ1	НЕ2	НЕ3	НЕ4	НЕ5
1	2	3	4	5	6
Енергоефективність	Найменша	Середня	Середня	Середня	Найбільша
Капіталовкладення	Середні	Найменші	Середні	Середні	Найбільші
Вплив на якість електроенергії	Найбільший	Середній	Середній	Середній	Найменший (не впливає)
Забезпечення підвищення пропускної здатності перегону	Найменше	Середнє	Середнє	Середнє	Найбільше
Вплив на строк служби елементів системи енергозабезпечення метрополітену	Найбільший	Середній	Середній	Середній	Найменший
Економічність*	Найменша	Найбільша	Середня	Середня	Середня
Можливість забезпечення автономного ведення рухомого складу під час виникнення аварійних режимів в системі енергозабезпечення метрополітену	Найменша	Середня	Середня	Середня	Найбільша

Кінець таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6
Вплив на розгінні і гальмівні характеристики поїзда	Не впливає	Не впливає	Не впливає	Не впливає	Впливає
Здійснення керування енергопроцесами	Складне	Складне	Складне	Складне	Просте
*Примітка. Визначення показника економічності було здійснено тільки з урахуванням заощаджень від підвищення енергоефективності в системі енергозабезпечення метрополітену.					

Слід зазначити, що зазначені показники (табл. 1.2) було оцінено за результатами порівняльного аналізу інформації довідкового характеру для кожного із варіантів розташування накопичувачів енергії.

Виконаний порівняльний аналіз за зазначеними показниками (табл. 1.2) дозволив встановити наступне:

– основними перевагами розташування накопичувачів енергії на районних підстанціях (HE1) є відсутність впливу на характеристики розгону і гальмування поїзда та можливість встановлення найменшої кількості накопичувачів (достатньо одного). Проте їх енергоемність має бути досить значною і складати більше ніж 10 ГДж [6, 98]. За даного розташування необхідно здійснювати оснащення тягових підстанцій інверторами, внаслідок чого потрібні додаткові капіталовкладення. Як наслідок, капіталовкладення для даного розташування мають середні показники. Інші показники підкреслюють тільки недоліки даного розташування. Зокрема, енергоефективність найменша і складає до 10 % електроенергії, що витрачається на тягу [171]. Вплив на якість електроенергії та строк служби елементів системи енергозабезпечення метрополітену найбільший внаслідок нелінійності джерела рекуперації і низького коефіцієнта потужності ТП в режимі інвертування електроенергії, а також здійснення транзиту додаткових надлишкових струмів через значну кількість елементів силового обладнання (проводів, шин, вентилів тощо). Забезпечення підвищення пропускної здатності найменша, оскільки наявний вплив умов інерційності системи та нагріву електричного обладнання. Можливість здійснення автономного руху поїзда найменша, оскільки у разі виникнення аварійного вимкнення основного джерела живлення на ділянці від РП до струмоприймачів, установлених на вагонах поїзда, подальший рух останнього в режимі тяги не представляється можливим. Під час здійснення керування енергопроцесами необхідно враховувати значну кількість факторів, які в цілому ускладнюють систему керування. Ускладнення системи керування полягає у використанні значної кількості контрольно-вимірювальних приладів на кожному етапі транзиту електроенергії та розробки на даних етапах непростих багаторівневих алгоритмів;

– основними перевагами розташування накопичувачів енергії на постах секціонування (HE2) є відсутність впливу на характеристики розгону і гальмування поїзда, капіталовкладення найменші, економічність найбільша. Загальна потрібна кількість накопичувачів на ПС – незначна, а їх енергоемність має складати близько (100–200) МДж [6, 98, 107]. Показники енергоефективності, впливу на якість електроенергії, забезпечення підвищення пропускної здатності перегону, впливу на строк служби елементів системи енергозабезпечення метрополітену, можливість забезпечення автономного ведення рухомого складу під час виникнення аварійних режимів в системі енергозабезпечення метрополітену – посередні. Енергоефективність складає до 25 % електроенергії, що витрачається на тягу [6, 107]. Вплив на якість електроенергії здійснюється завдяки нелінійності джерела рекуперації. Строк служби елементів системи енергозабезпечення метрополітену знижується за рахунок зменшення ресурсу проводів, шин внаслідок протікання по ним додаткових надлишкових струмів. Рух поїзда в режимі тяги є неможливим під час виникнення аварійної ситуації на ділянці від ТП до струмоприймачів, установлених на вагонах поїзда. Недоліком розміщення HE2 є необхідність врахування режимів ведення інших споживачів електроенергії і, як наслідок, ускладнення побудови алгоритмів роботи та власне розробки системи керування енергообмінними процесами;

– основними перевагами розташування накопичувачів енергії на тягових підстанціях (HE3) є відсутність впливу на характеристики розгону і гальмування поїзда. Інші показники посередні, за винятком показника здійснення керування енергообмінних процесів. Синтез системи керування є складним внаслідок необхідності врахування умов експлуатації інших споживачів. Основні переваги та недоліки, а також посередні характеристики за умови розташування накопичувачів на виході ТП вздовж лінії контактної мережі (HE4) аналогічні тим, що і у разі розташування HE3. Відмінність розташування HE3 та HE4 визначається за їх основним функціональним призначенням. Для розміщення HE3 основним функціональним призначенням є прийняття електроенергії рекуперативного гальмування поблизу джерела її вивільнення, завдяки чому зменшуються втрати в контактній мережі; для розміщення HE4 – стабілізація напруги контактної мережі на кінцях консольних ділянок тягової мережі, внаслідок чого підвищується пропускна здатність перегону. Загальна кількість встановлення накопичувачів HE3 та HE4 середня, а їх енергоемність має становити до 100 МДж [98];

– основними перевагами розміщення накопичувачів енергії на рухомому складі (HE5) є найбільша енергоефективність; відсутність впливу на якість електроенергії контактної мережі та строк служби її елементів (проводів, шин, тощо); можливість забезпечення автономного ведення рухомого складу під час виникнення аварійних режимів в системі енергозабезпечення метрополітену та підвищення пропускної здатності перегону – найбільші; здійснення керування енергопроцесами у порівнянні з іншими місцями розташування найбільш просте. Енергоефективність складає до 35 % електроенергії, що витрачається на тягу [98, 171].

Електроенергія рекуперативного гальмування циркулює по малому колу без її вивільнення в контактну мережу, завдяки чому не відбувається впливу на якість електроенергії контактної мережі та строк служби її елементів. З'являється можливість автономного ведення рухомого складу під час виникнення аварійних ситуацій на будь-яких ділянках системи енергозабезпечення метрополітену. Пропускна здатність підвищується до 50 % [106]. Показник економічності є середнім у порівнянні з іншими місцями розташування. Недоліком розташування HE5 є необхідність найбільших капіталовкладень та вплив на характеристики розгону і гальмування поїзда. Загальна кількість встановлення накопичувачів HE5 найбільша, оскільки потрібно оснащувати такою системою кожен рухомий склад, що потребує значних капіталовкладень [6, 98, 106, 107]. Їх енергоємність має становити до 30 МДж [98, 171].

За результатами порівняльного аналізу однозначно відповісти, яке розміщення накопичувачів енергії є раціональним, не представляється можливим, оскільки кожне місце розташування має свої переваги і недоліки. Єдиним винятком є розташування на районній тяговій підстанції (HE1), яке можна виключити з пошуку раціонального внаслідок наявності значної кількості недоліків. Таким чином, автором запропоновано визначати раціональне місце розташування накопичувача енергії за бальною шкалою шляхом застосування вагових коефіцієнтів [172]. Сутність запропонованого підходу з визначення раціонального місця розташування накопичувача полягає у розробці критеріїв оцінки для кожного показника, за яким здійснюється порівняння, а також у визначенні сумарної кількості балів для кожного місця розташування та безпосередньо вибору раціонального місця розташування за максимальною кількістю балів.

В даному випадку прийнято наступні критерії оцінки для показників: енергоефективності, економічності, забезпечення підвищення пропускної здатності перегону, можливості забезпечення автономного ведення рухомого складу під час виникнення аварійних режимів в системі енергозабезпечення метрополітену: за найменших значень – 1 бал, середніх – 2 бали, найбільших – 3 бали; для показників: капіталовкладення, вплив на якість електроенергії та строк служби елементів системи енергозабезпечення метрополітену за найбільших значень – 1 бал, середніх – 2 бали, найменших – 3 бали. За показником здійснення впливу на характеристики розгону і гальмування поїзда та складності керування енергопроцесами ставиться 1 бал, в інших випадках – 2 бали.

З урахуванням прийнятих умов оцінки максимальна кількість балів може скласти 25. Результати розрахунку балів для розглянутих місць розташування накопичувачів енергії наведені у вигляді діаграм на рис. 1.12.

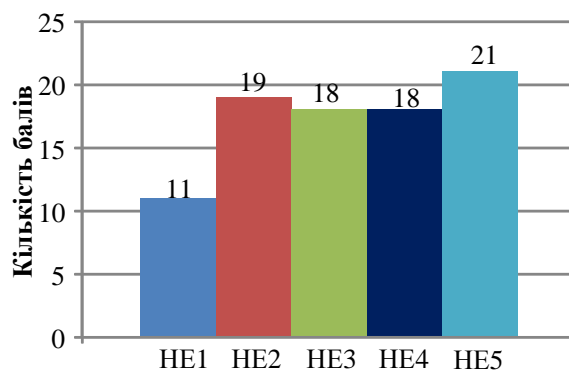


Рис. 1.12 – Результати розрахунку балів для різних місць розташування накопичувачів енергії

Отже, за результатами аналізу численних досліджень [6, 62, 81, 86, 99, 106] та на підставі запропонованого підходу [172] визначено, що для умов метрополітену найбільш раціональним є бортове розташування накопичувачів на рухомому складі (HE5). Серед основних недоліків розміщення HE5 є значні капіталовкладення та вплив на характеристики розгону і гальмування рухомого складу. Проте значні капіталовкладення можуть бути компенсовані найбільшим техніко-економічним ефектом за рахунок максимальної енергоефективності, максимального зменшення встановленої потужності силового обладнання, мінімального впливу на якість електроенергії та строк служби елементів системи енергозабезпечення метрополітену тощо. Задачу зменшення впливу на характеристики розгону і гальмування рухомого складу можливо вирішувати різними методами залежно від конкретного проекту, зокрема завдяки можливості підвищення максимального значення сили тяги (гальмування) програмно на етапі введення в експлуатацію. Тому в подальшій роботі пропонується досліджувати варіант бортового розміщення накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену.

1.4 Аналіз технічних рішень щодо керування енергообмінними процесами між бортовим накопичувачем енергії та тяговим електроприводом

Одним з актуальних питань за розташування накопичувача енергії на рухомому складі метрополітену, яке доцільно детально розглянути, є аналіз існуючих технічних рішень для здійснення керування енергооб-

мінними процесами між електроприводом рухомого складу, накопичувачем і контактною мережею та пошук серед них раціонального.

Існуючі технічні рішення щодо керування енергообмінними процесами на тяговому електрорухомому складі (ЕРС) з бортовим накопичувачем енергії (БНЕ) проаналізовано шляхом огляду низки досліджень [47, 56, 62, 73, 77, 78, 93, 99, 128, 143, 144, 146, 173–181]. Під час зазначеного аналізу розглянуто технічні рішення, які застосовуються як на рухомому складі метрополітену, так і на іншому тяговому ЕРС постійного струму (електропоїздах приміського сполучення, електровозах, трамваях тощо). За результатами їх аналізу встановлено, що керування енергообмінними процесами між БНЕ та тяговим електроприводом може бути нерегульованим та регульованим. За умов нерегульованого керування можливе безпосереднє підключення БНЕ до тягового електроприводу, а також через струмообмежуючі некеровані пристрої (резистори, котушки індуктивності або конденсатори, некеровані перетворювачі з незмінним алгоритмом роботи в режимі зарядження та розрядження БНЕ). У разі регульованого керування, підключення БНЕ до тягового електроприводу здійснюється через перетворювач регульованого типу. З метою визначення переваг та недоліків застосування відповідного технічного рішення у системах накопичення енергії для здійснення керування енергообмінними процесами виконано їх порівняльний аналіз за наступними показниками: коефіцієнтом корисної дії (ККД) енергообмінних процесів, величиною «мертвого» об'єму БНЕ, коефіцієнтом використання пристрою, вартістю і масою [78, 99, 173–175, 181]. Результати їх порівняльного аналізу наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Порівняльний аналіз різних схем підключення БНЕ

Тип підключення БНЕ до тягового електроприводу	ККД, %	Величина «мертвого» об'єму БНЕ, %	Вартість СНЕ*	Маса СНЕ*	Коефіцієнт використання пристрою
1	2	3	4	5	6
Нерегульований тип керування режимами заряду та розряду БНЕ					
Безпосереднє підключення	90–98	62–90	–	у 1,5–2 рази менші	–
Резистор	30–50	40–65	у 1,5–2,5 рази менша	у 2–3 рази менші	0,5–0,6
Котушка, конденсатор	50–90	35–60	у 1,5–1,8 рази менша	–	0,6–0,7
Некерований перетворювач	40–60	15–40	у 2,5–4 рази менша	у 2,5–5 рази менші	0,8–1,0
Регульований тип керування режимами заряду та розряду БНЕ					
Транзисторний перетворювач постійної напруги в постійну	90–94	5–20	у 2–3 рази менша	у 3,5–7 рази менші	0,8–1,0
Регульовані пристрої при зарядці постійним струмом – амплітудно-імпульсне регулювання; – частотно-імпульсне регулювання;	87–92	10–40	у 1,5–3 рази менша	у 2,5–5,5 рази менші	0,5–0,7
Регульовані пристрої, що підтримують режим постійної потужності	82–90	10–40	у 1,5–3 рази менша	у 3–5 рази менші	0,6–0,7
*Примітка. Позначка «–» вказує на пристрій, за умов впровадження якого спостерігаються найбільші показники вартості і масогабаритів СНЕ. Для інших пристроїв дані показники розраховано за відношеннями до найбільших значень.					

Показники вартості та масогабаритів наведено для СНЕ в цілому з урахуванням вартості та масогабаритів самого пристрою (за умови його наявності) й БНЕ.

У разі безпосереднього підключення БНЕ до тягового електроприводу спостерігається низький відсоток робочого об'єму БНЕ («мертвий» об'єм знаходиться на рівні (62–90) %), в наслідок чого потрібен БНЕ зі значною загальною енергоємністю [78, 99, 173–176]. Процеси зарядження та розрядження є нестабільними і залежать від багатьох факторів, передусім від величини напруги в контактній мережі. Отже, існує чітка залежність стабільності протікання енергообмінних процесів між тяговим приводом і БНЕ від енергетичних процесів в контактній мережі. Однак за умов протікання стабільного процесу енергообміну його ККД буде досить високим (на рівні (90–98) %). Також відсутня необхідність застосування додаткових пристроїв та систем керування, значно збільшується ресурс роботи БНЕ.

Таким чином, *перевагами* схеми безпосереднього підключення БНЕ є високий ККД енергообмінних процесів, відсутність додаткових пристроїв та системи керування (просте та надійне технічне рішення), значний ресурс роботи БНЕ; *недоліками* – необхідність застосування БНЕ великої енергоємності, вагомні масові та вартісні показники БНЕ, нестабільність протікання енергообмінних процесів, значні імпульсні струмові навантаження, які зменшують ресурс роботи тягових двигунів.

Основна функція елементів формування струму (резисторів, котушок, конденсаторів) полягає у обмеженні струмів під час процесів зарядження та розрядження БНЕ [173–175]. Найбільш простим та надійним є підключення БНЕ через резистор, проте ККД процесів зарядження та розрядження не перевищує

50 %, що суттєво обмежує область його застосування. За умов послідовного підключення котушки індуктивності або паралельного підключення конденсатора ККД енергообмінних процесів підвищується і складає на рівні (50–90) %, проте маса та вартість СНЕ зростають. Отже, в цілому застосування елементів формування струму для здійснення керування енергообмінними процесами не отримало суттєвого поширення (особливо це стосується СНЕ з потужними БНЕ) внаслідок наступних *недоліків*: низький ККД процесів зарядження та розрядження, значна маса і вартість СНЕ. *Перевагою* застосування елементів формування струму у порівнянні з безпосереднім підключенням БНЕ є зниження величини «мертвого» об'єму та підвищення стабільності протікання енергообмінних процесів.

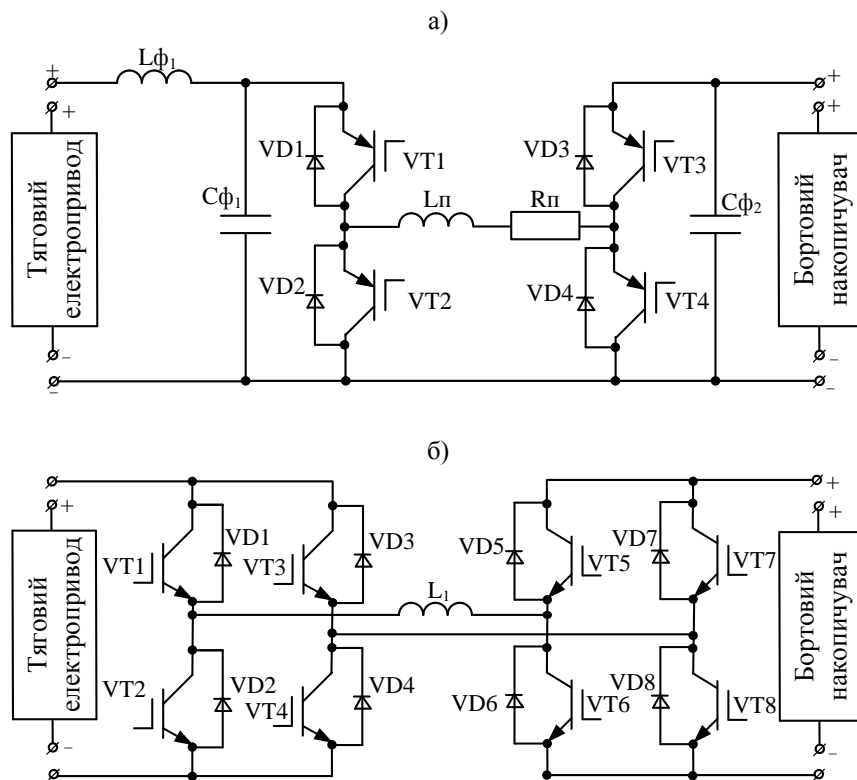
Під час здійснення керування режимами зарядження та розрядження БНЕ через некерований статичний перетворювач спостерігається низький ККД енергообмінних процесів (на рівні (40–60) %), значний відсоток робочого об'єму БНЕ («мертвий» об'єм знаходиться на рівні (15–35) %). Процеси зарядження та розрядження є відносно стабільними [78, 99, 173–176].

Перевагами схеми підключення БНЕ до тягового електроприводу через некерований перетворювач є невелика величина «мертвого» об'єму БНЕ, стабільність протікання енергообмінних процесів та максимальний коефіцієнт використання пристрою, серед *недоліків* – низький ККД процесів зарядження та розрядження, значні показники маси та вартості СНЕ.

За умов використання пристроїв регульованого типу (статичних перетворювачів) є наступні *переваги*: високий ККД процесів зарядження та розрядження, мала величина «мертвого» об'єму БНЕ, стабільність протікання енергообмінних процесів та максимальний коефіцієнт використання пристрою, можливість роботи в широкому діапазоні робочих напруг. *Недоліками* даних схемних рішень є необхідність застосування датчиків та систем керування для здійснення ефективного і стабільного протікання енергообмінних процесів між накопичувачем та тяговим електроприводом рухомого складу.

За результатами порівняльного аналізу (табл. 1.3) помітно, що очевидною є перевага застосування пристроїв регульованого типу. Ця перевага полягає, насамперед, у зменшенні маси і вартості СНЕ, підвищенні ККД процесів зарядження та розрядження БНЕ, зниженні величини «мертвого» об'єму БНЕ. Таким чином, встановлено, що керування енергообмінними процесами шляхом застосування статичного перетворювача регульованого типу є більш раціональним.

З джерел [173–175] відомо, що в статичних перетворювачах керування енергообмінними процесами здійснюється з амплітудо-імпульсним, або широтно-імпульсним, або частотно-імпульсним регулюванням. При цьому в конструкції статичних перетворювачів зазвичай застосовують дозатори електроенергії (індуктивні, ємнісні, індуктивно-ємнісні) [173–175]. Силкові типові схеми статичних перетворювачів регульованого типу для здійснення керування енергообмінними процесами між накопичувачем та електроприводом, які в переважній більшості запропоновано використовувати на тяговому складі, зображено на рис. 1.13 [77, 99, 144, 173, 175, 179]. На рис. 1.13 використано такі позначення: VT1...VT8 – IGBT-транзистори; VD1...VD8 – діоди; L1, C1 – індуктивність та ємність дозатора енергії в схемі перетворювача, Lф1, Cф1, Cф2 – індуктивність та ємність фільтра; Rп, Lп – опір та індуктивність перетворювача.



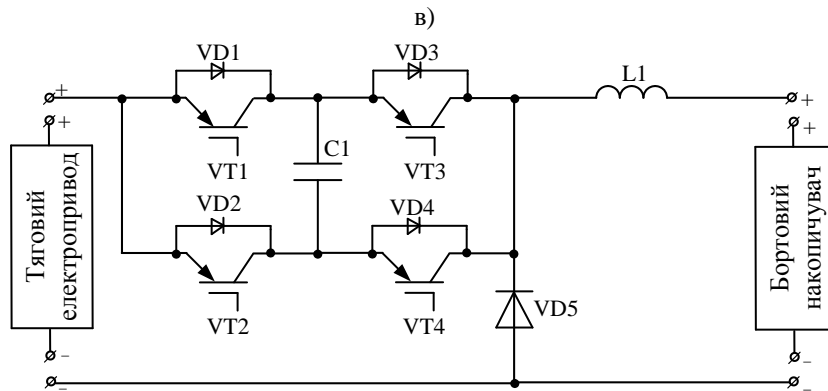


Рис. 1.13 – Силві типові схеми статичних перетворювачів регульованого типу

Блок-схему тягового електроприводу з накопичувачем енергії, в якому керування енергообмінними процесами здійснюється через перетворювач регульованого типу, зображено на рис. 1.14.

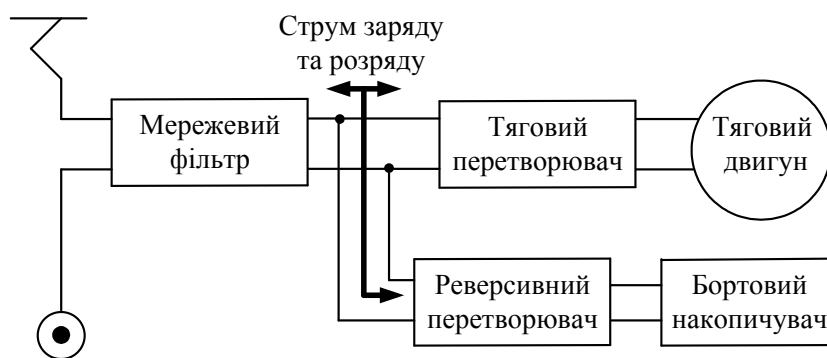


Рис. 1.14 – Блок-схема тягового електроприводу з накопичувачем енергії

Аналіз робіт [56, 62, 73, 77, 78, 99, 176, 178–181] дозволив визначити, що серед імпульсних перетворювачів найбільш раціональним та енергоефективним для керування енергообмінними процесами на тяговому рухомому складі з БНЕ, зокрема метрополітені, є використання реверсивного за струмом широтно-імпульсного перетворювача з індуктивним або ємнісним дозатором електроенергії. При цьому даний перетворювач має забезпечувати понижувальний та підвищувальний коефіцієнт перетворення напруги в декілька одиниць.

1.5 Постановка задач досліджень

Аналіз сучасного стану проблеми підвищення безпеки та ефективності експлуатації залізничного тягового рухомого складу показав можливість їх вирішення за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування шляхом впровадження накопичувачів енергії. Однак, незважаючи на значний накопичений досвід та вже досягнуті результати, деякі з порушених науково-прикладних задач вирішені не в повному обсязі та залишаються актуальними. Огляд наукових робіт та досліджень, які виконувались останнім часом за даним напрямком, дозволив визначити основні проблемні та маловивчені питання:

- оцінка резервів заощадження енергоресурсів під час експлуатації рухомого складу метрополітену за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування;
- обґрунтування вибору раціонального типу накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації;
- розроблення наукових основ визначення параметрів накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації під час заданих умов його експлуатації та автоматизація відповідних процедур;
- створення концептуально нового методу визначення раціональних параметрів бортового накопичувача енергії з використанням спеціалізованого комп'ютерного програмного забезпечення, здатного моделювати раціональний режим ведення поїзда метрополітену;
- розроблення технічного рішення системи накопичення на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації на базі бортових накопичувачів енергії.

Висновки за розділом 1

1. Основними заходами з підвищення ефективності використання електроенергії є коригування існуючих графіків руху поїздів, встановлення регуляторів напруг на шинах ТП, обладнання ТП інверторами, впровадження систем для пошуку раціональних режимів ведення поїздів, впровадження СНЕ.

2. Найбільш перспективним та раціональним заходом з підвищення ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування є впровадження СНЕ. Їх упровадження, залежно від інтенсивності руху поїздів на лінії, місця розташування в системі електропостачання, типу та параметрів накопичувача, дозволить заощадити використання електроенергії на рівні (10–50) %.

3. Узагальнений аналіз існуючих досліджень щодо перспективи розвитку тягового залізничного транспорту з накопичувачами енергії дозволив отримати наступні висновки:

– дослідження із застосування накопичувачів на тяговому залізничному транспорті в основному здійснюються за трьома напрямками: створення систем для запуску двигунів внутрішнього згорання автономного залізничного транспорту, створення гібридного автономного транспорту та ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування неавтономного електротранспорту. Впровадження вищезазначених систем дозволить знизити потужність та збільшити строк служби акумуляторних батарей, зменшити витрати на їх обслуговування, а також забезпечити стабільний запуск двигуна за низьких температур навколишнього середовища. Використання накопичувачів енергії на гібридному залізничному транспорті дозволить знизити витрати пального, зменшити шкідливі викиди та рівень шуму, а також підвищити його тягові можливості. Впровадження накопичувачів енергії на залізничному електротранспорті дозволить зменшити витрати електроенергії на тягу, знизити встановлену потужність ТП, стабілізувати напругу контактної мережі;

– значні перспективи впровадження накопичувачів має тяговий залізничний транспорт з різко змінним навантаженням, зокрема на електровозах, приміських електропоїздах та дизель-поїздах, маневрових тепловозах, кар'єрних рудникових електровозах, трамваях, поїздах метрополітену. Визначено резерви заощаджень палива та електроенергії у разі впровадження накопичувачів енергії на перелічених типах тягового залізничного транспорту. Серед автономного транспорту найбільші перспективи впровадження накопичувачів внаслідок особливостей умов експлуатації мають маневрові тепловози (скорочення витрат палива до 50 %), серед неавтономного – поїзди метрополітену (скорочення витрат електроенергії на тягу до 50 %);

– одним з найбільш перспективних видів транспорту для впровадження накопичувачів енергії є метрополітен в силу особливостей умов експлуатації його рухомого складу: стабільний графік руху у порівнянні з іншими видами залізничного транспорту; чітко виражений імпульсний характер навантаження; незначні відстані між станціями, як наслідок, часті пуски та гальмування; часто змінюваний профіль колії; необхідність частого розгону та сповільнення внаслідок зміни обмежень швидкості для різних ділянок колії.

– визначено комплекс основних задач, які можливо вирішити шляхом впровадження накопичувачів енергії в метрополітені.

4. Оновлення парку вагонів метрополітену в Україні здійснюється за двома напрямками: придбання нових та проведення глибокої модернізації з одночасним продовженням строку експлуатації існуючих вагонів. Вітчизняна промисловість має можливості в забезпеченні оновлення парку вагонів метрополітену в країні і виготовляє сучасні інноваційні моделі вагонів метро, які не поступаються світовим аналогам. Одним з основних напрямків подальшого розвитку рухомого складу метрополітену є підвищення безпеки руху і зниження споживання електроенергії шляхом впровадження систем накопичення.

5. На основі виконаного узагальненого аналізу існуючих досліджень та запропонованого підходу з використанням бальної шкали оцінки шляхом застосування вагових коефіцієнтів встановлено, що найбільш раціональним є розташування накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену.

6. За результатами узагальненого аналізу значної кількості існуючих досліджень за даним напрямком роботи встановлено, що найбільш раціональним та енергоефективним пристроєм для керування процесами зарядження та розрядження БНЕ на рухомому складі метрополітену є статичний реверсивний перетворювач регульованого типу з дозаторами енергії. Його застосування дозволить отримати ККД процесів зарядження та розрядження на рівні (85–94) %, встановити величину «мертвого» об'єму на рівні (5–25) % та знизити масогабарити БНЕ у (2,5–4) рази у порівнянні з безпосереднім підключенням.

7. Окреслено маловивчені та актуальні питання при застосуванні бортових накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації, вирішення яких дозволить підвищити його енергоефективність та отримати максимальний техніко-економічний ефект на даному виді транспорту. Узагальнення матеріалів проаналізованих досліджень дозволило сформулювати задачі подальших досліджень.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ШТАТНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦІЇ

2.1 Розробка експериментального випробувального комплексу для дослідження енергообмінних процесів

Одним з ключових питань за впровадження систем рекуперації на рухомому складі метрополітену є оцінка кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час реальних умов його експлуатації. Актуальність вирішення даного питання обумовлена необхідністю визначення фактичної ефективності від застосування зазначених систем на рухомому складі метрополітену. Слід зазначити, що оцінку фактичної ефективності впровадження систем рекуперації на рухомому складі проведено в ряді досліджень як вітчизняних, так і іноземних вчених.

Так, наприклад, в роботах [89, 92] виконано оцінку можливої кількості заощадженої електроенергії у реальних умовах експлуатації рухомого складу з реостатним гальмуванням в КП «Дніпропетровський метрополітен»; в роботі [99] – в Московському метрополітені. Зазначені дослідження було здійснено на рухомому складі метрополітену без можливості рекуперації електроенергії до контактної мережі. За результатами цих досліджень встановлено, що в режимі реостатного гальмування утилізується від 15 % до 52 % електроенергії, яка витрачається на тягу поїздів.

В роботах [45, 168, 182] оцінку було виконано для рухомого складу метрополітену з встановленими на ньому системами рекуперації. В дослідженнях [45, 168] оцінку здійснено без урахування реальних умов експлуатації для рухомого складу метрополітену (зміни профілю колії, завантаження вагонів, графіку руху тощо). За результатами аналізу дослідження [182] встановлено, що впровадження систем рекуперації на вагонах моделей 81.715, 81.716 в умовах їх експлуатації на одній з ліній Московського метрополітену з максимальним завантаженням вагонів дозволяє заощадити у середньому близько 9,4 % електроенергії, яка витрачається на тягу поїздів. Аналіз робіт [45, 168] дозволив встановити, що застосування систем накопичення енергії дозволить додатково зберегти близько (10–20) % електроенергії, що споживається на тягу рухомих складом метрополітену з системами рекуперації.

Вирішенню цього питання також приділено достатньо уваги в роботах іноземних вчених [122–130, 140–146, 150–153, 161], в яких його піддано детальному та повному розгляду. За результатами аналізу цих досліджень встановлено, що резерви додаткових заощаджень за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування шляхом впровадження накопичувачів енергії складають від 10 % до 30 %. Однак ці дослідження проведено з урахуванням умов експлуатації метрополітенів іноземних країн, тому в них не може бути враховано особливості системи енергозабезпечення вітчизняного метрополітену.

Таким чином, виконані дослідження не дають змогу оцінити ефективність від впровадження систем рекуперації на рухомому складі в повному обсязі. Зокрема, відсутні дослідження з оцінки ефективності зазначених систем під час зміни штатних умов експлуатації рухомого складу у вітчизняному метрополітені (завантаження вагонів, графіку руху тощо). Отже, питання оцінки кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації для аналізу резервів енергозбереження залишається актуальним.

Для проведення вищезазначених досліджень в умовах КП «Київський метрополітен» за участю фахівців ПАТ «КВБЗ» та ДП «УкрНДІВ» розроблено експериментальний випробувальний комплекс, блок-схему якого наведено на рис. 2.1. До складу комплексу входить дослідний п'ятивагонний рухомий склад та вимірвальна система, що встановлена на його борту.

Для дослідження енергопроцесів між контактною мережею та поїздом як дослідний зразок обрано п'ятивагонний рухомий склад з асинхронним приводом та системою рекуперації, в якому головні вагони безмоторні, проміжні – моторні (комплектація 3М+2П). Конфігурацію дослідного п'ятивагонного рухомого складу метрополітену з системою рекуперації зображено на рис. 2.1.

Головні вагони укомплектовані блоками власних потреб (БВП), які з'єднані з струмоприймачами (СТ) через автоматичні вимикачі (АВ). Встановлені БВП забезпечують живленням нетягове електрообладнання поїзда. Основними функціями АВ є підключення кола живлення нетягового електрообладнання до контактної мережі та його захист під час виникнення аварійних режимів. Установлені на головних вагонах СТ забезпечують споживання електроенергії з мережі на власні потреби.

Проміжні вагони укомплектовані асинхронними тяговими двигунами (АТД) типу МВ-5149-А на кожній колісній парі з наступними номінальними параметрами: $P_n = 150$ кВт; $U_n = 610$ В; $I_n = 185$ А; $f_n = 65$ Гц, $\eta_n = 0,91$; $n_n = 1900$ об/хв; $s_n = 2,4$ %. При цьому позначення P_n – номінальна потужність; U_n – номінальна напруга; I_n – номінальний струм; f_n – номінальна частота; η_n – номінальний коефіцієнт корисної дії; n_n – номінальна частота обертання; s_n – номінальне ковзання двигуна.

Асинхронні ТД моторних вагонів отримують живлення від статичного тягового перетворювача (СТП), який складається з двох інверторів та має блочно-модульну конструкцію. Інвертори забезпечують плавне регулювання вихідної напруги від нуля до максимального значення. Один інвертор забезпечує управління двома АТД. Конструкція інвертора також передбачає рекуперативне гальмування за наявності споживача електроенергії в мережі та реостатне гальмування за допомогою блоків резисторів (БР) у разі відсутності споживачів. Силкові тягові перетворювачі з'єднано з СТ через швидкодіючий вимикач (ШВ) та головний вимикач (ГВ).

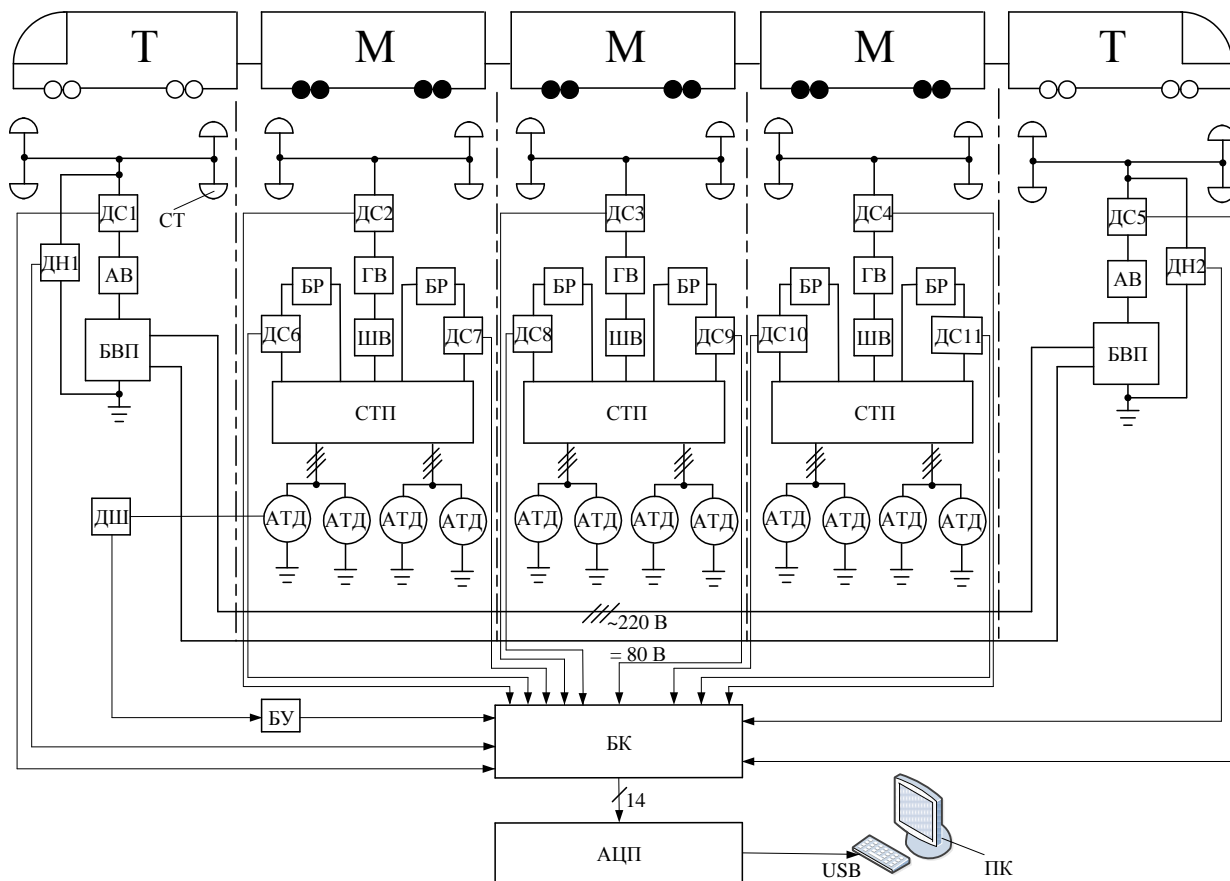


Рис. 2.1 – Блок-схема експериментального випробувального комплексу

Вимикачі (ШВ, ГВ) встановлено на кожному проміжному моторному вагоні з метою підключення силового електрообладнання (СТП, АТД) до контактної мережі та його захисту під час виникнення аварійних режимів в силовому колі. Встановлені на проміжних моторних вагонах СТ, забезпечують енергообмін між мережею та вагонами в режимах споживання та рекуперативної гальмування.

Фахівцями ДП «УкрНДІВ» розроблено вимірювальну систему для дослідження енергопроцесів між контактною мережею та рухомих складом в реальних умовах його експлуатації.

До складу вимірювальної системи входять: персональний комп'ютер (ПК), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), блок комутації (БК), блок узгодження (БУ) та вимірювальні датчики.

В якості вимірювальних датчиків використовують одинадцять датчиків струму (ДС1-ДС11), два датчики напруги (ДН1-ДН2) та датчик швидкості (ДШ). Контроль спожитого струму на власні потреби здійснюють ДС1 та ДС5, контроль загального струму споживання на тягу та рекуперативну гальмування виконують ДС2-ДС4, контроль струму за реостатного гальмування відповідно ДС6-ДС11. Контроль напруги контактної мережі здійснюється за допомогою ДН1 та ДН2. Вимірювання швидкості поїзда здійснюється за допомогою ДШ.

Для узгодження типу та рівня вихідного сигналу ДШ з вхідним каналом АЦП використовується БУ. Сигнали з виходів вимірювальних датчиків через БК надходять на вхідні канали АЦП, який виконує функцію перетворення аналогових сигналів в цифрову форму для подальшої обробки на ПК.

Обробка даних на ПК здійснюється за допомогою атестованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО» розробленого спеціалістами ДП «УкрНДІВ» [183, 184]. Вимірювальна система передбачає отримання, відображення та збереження даних, отриманих від вимірювальних датчиків, які встановлені на дослідному рухомих складі. Слід зазначити, що дана система є універсальною, оскільки може застосовуватись для дослідження енергопроцесів практично на всіх типах електрорухомого складу.

Таким чином, розроблено вимірювальну систему для експериментальних досліджень енергообмінних процесів між контактною мережею та рухомих складом метрополітену з системами рекуперативної гальмування.

2.2 Оцінка резервів заощаджень енергоресурсів у вітчизняному метрополітені за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування

З використанням експериментального випробувального комплексу проведено дослідження щодо оцінки резервів заощаджень енергоресурсів у вітчизняному метрополітені. Ці дослідження передбачають реєстрацію даних енергообмінних процесів під час типових штатних умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації, їх обробку та аналізування.

Дослідження енергообмінних процесів виконано на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен» під час експлуатації рухомого складу з системами рекуперації в типових штатних умовах протягом доби. Під типовими штатними умовами експлуатації мається на увазі наступні режими: максимальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху, номінальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху, мінімальне завантаження (зайняті сидячі місця) з дотриманням «непікового» графіку руху.

Графіки напруги контактної мережі та струму вагона поїзда метрополітену під час режиму рекуперативного гальмування, зображено на рис. 2.2. Осцилограми напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху поїзда під час його експлуатації з максимальним завантаженням між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії за умов дотримання «непікового» графіку руху, приведені на рис. 2.3–2.4.

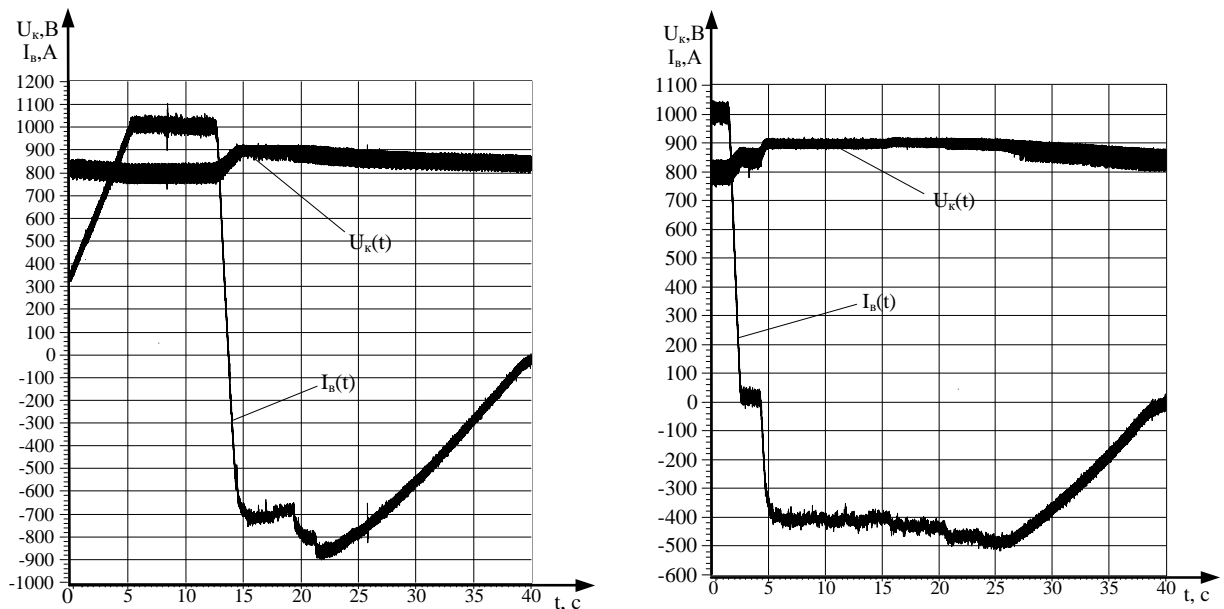
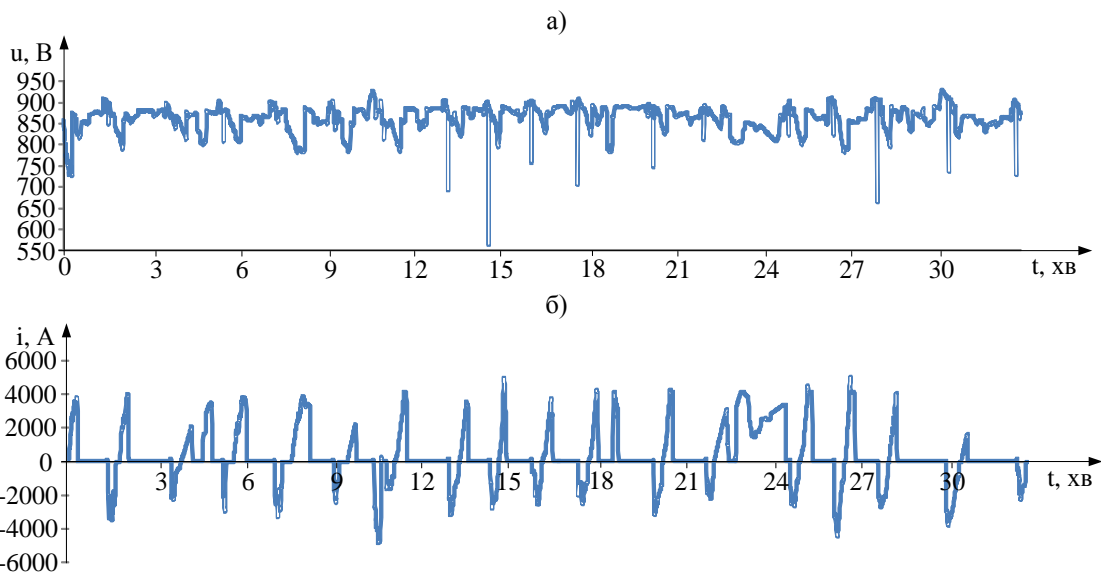


Рис. 2.2 – Графіки напруги контактної мережі та струму вагона поїзда метрополітену під час режиму рекуперативного гальмування



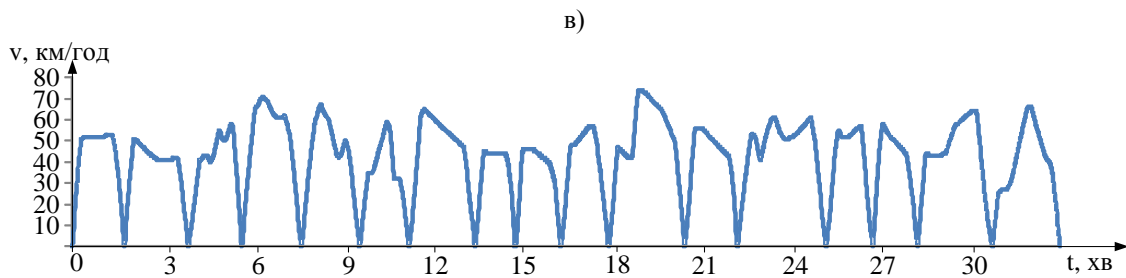


Рис. 2.3 – Осцилограми напруги на струмоприймачі (а), струму поїзда (б) та швидкості руху поїзда (в) під час його експлуатації між станціями «Лісова–Академмістечко»

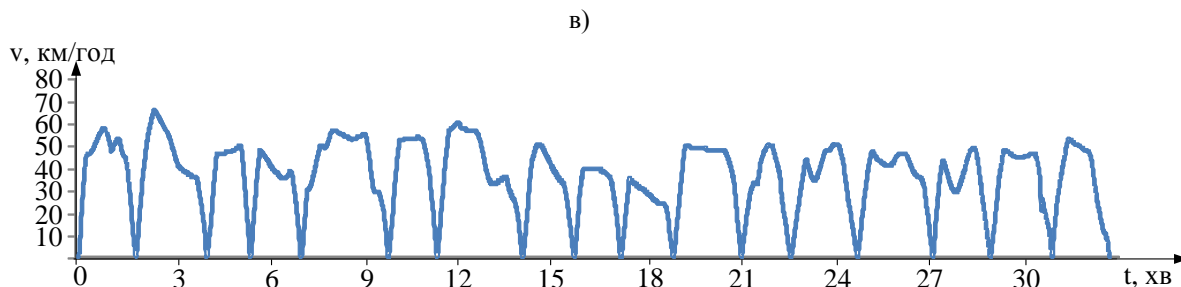
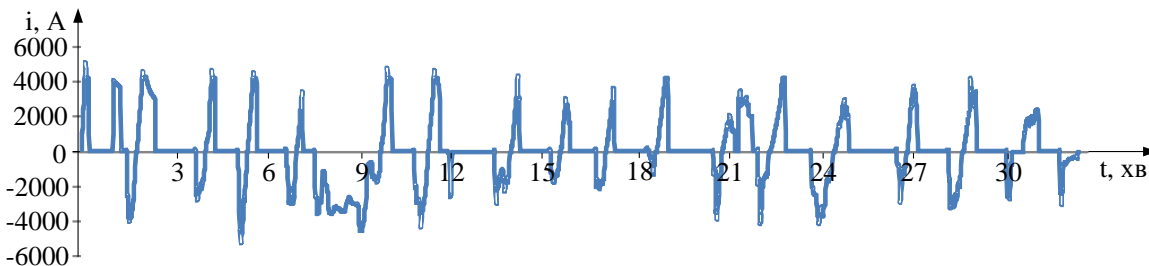
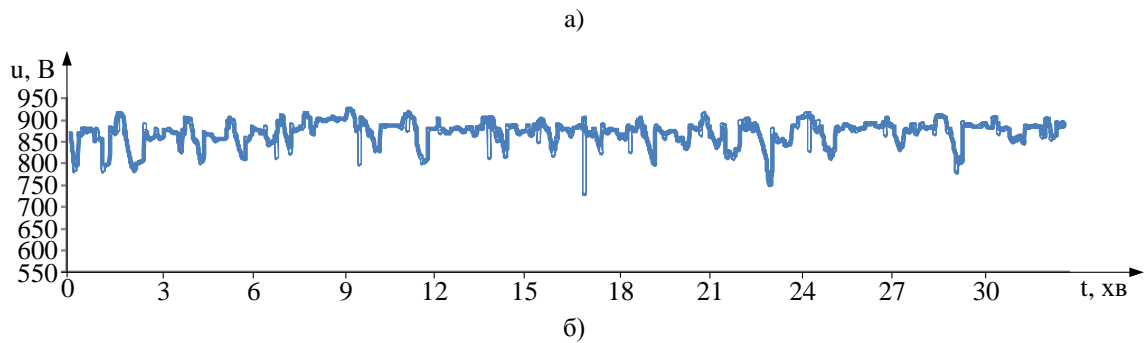


Рис. 2.4 – Осцилограми напруги на струмоприймачі (а), струму поїзда (б) та швидкості руху поїзда (в) під час його експлуатації між станціями «Академмістечко–Лісова»

Аналогічним чином було отримано осцилограми для інших заданих умов ведення поїзда (максимальне завантаження з дотриманням «пікового» графіка руху, номінальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху, мінімальне завантаження з дотриманням «непікового» графіку руху). Також для зазначених штатних умов експлуатації були отримані осцилограми напруги на гальмівних резисторах та струму, який розсіяно у вигляді теплоти на гальмівних резисторах. Таким чином, за допомогою вимірювальної системи було зафіксовано з частотою дискретизації 2,5 кГц напругу на струмоприймачі $u(t)$, струм поїзда в режимах тяги та рекуперативного гальмування $i(t)$; напругу на гальмівних резисторах $u_R(t)$, струм на гальмівних резисторах $i_R(t)$, а також швидкість руху поїзда $v(t)$.

За результатами обробки масивів даних, що отримані під час експлуатації рухомого складу з системами рекуперації в типових штатних умовах визначено наступні показники: середні значення напруги контактної мережі в режимах тяги і рекуперативного гальмування ($U_{\text{сер.тяги}}$, $U_{\text{сер.рек}}$); середні значення струму в режимах тяги поїзда ($I_{\text{сер.тяги}}$); середнє значення струму, що генерується поїздом до контактної мережі під час рекуперативного гальмування ($I_{\text{сер.рек}}$); середнє значення напруги на гальмівних резисторах ($U_{\text{сер.R}}$); середнє значення струму, що розсіюється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах в режимі рекуперативного гальмування ($I_{\text{сер.R}}$); час руху в режимах тяги та рекуперативного гальмування ($t_{\text{тяги}}$, $t_{\text{рек}}$), а також середню експлуатаційну швидкість на перегоні ($V_{\text{сер.екс}}$).

За визначеними величинами в процесі обробки масивів даних розраховано наступні енергетичні показники: кількість спожитої електроенергії в режимах тяги ($A_{\text{тяги}}$); кількість електроенергії, що генерується до контактної мережі ($A_{\text{рек}}$); кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (A_R); коефіцієнт рекуперації ($k_{\text{рек}}$); коефіцієнт, який характеризує кількість невикористаної (надлишкової) електроенергії (k_R); коефіцієнт, який характеризує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування (k_r).

Кількість електроенергії, що споживається в режимах тяги, розраховують за формулою (2.1) [185]:

$$A_{\text{тяги}} = \frac{I_{\text{сер.тяги}} \cdot U_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot 1000} \quad (2.1)$$

Кількість електроенергії, що генерується до контактної мережі, визначають за формулою (2.2) [185]:

$$A_{\text{рек}} = \frac{I_{\text{сер.рек}} \cdot U_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000} \quad (2.2)$$

Кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (надлишкова енергія), розраховується за формулою (2.3) [167, 185]:

$$A_R = \frac{U_{\text{сер.R}} \cdot I_{\text{сер.R}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000} \quad (2.3)$$

Коефіцієнт рекуперації визначається за відношенням згенерованої електроенергії до контактної мережі під час рекуперативного гальмування до спожитої електроенергії в режимі тяги за формулою (2.4) [92]:

$$k_{\text{рек}} = \frac{A_{\text{рек}}}{A_{\text{тяги}}} \quad (2.4)$$

Коефіцієнт, який характеризує кількість невикористаної (надлишкової) електроенергії під час рекуперативного гальмування визначається за відношенням (2.5):

$$k_R = \frac{A_R}{(A_{\text{рек}} + A_R)} \quad (2.5)$$

Коефіцієнт, який характеризує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування, визначається за відношенням (2.6):

$$k_r = \frac{A_R}{A_{\text{тяги}}} \quad (2.6)$$

Крім того, для кожного штатного режиму експлуатації поїзда між кінцевими станціями визначались питомі витрати електроенергії на тягу без урахування та з урахуванням згенерованої до контактної мережі електроенергії рекуперації.

Питомі витрати електроенергії на тягу визначаються за формулою (2.7) [167, 185]:

$$a_{\text{пит}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot m \cdot L} \quad (2.7)$$

де m – маса поїзда;

L – довжина ділянки.

Питомі витрати електроенергії на тягу з урахуванням електроенергії рекуперації визначаються за формулою (2.8) [167]:

$$a_{\text{пит.рек}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot m \cdot L} - \frac{U_{\text{сер.рек}} \cdot I_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot m \cdot L} \quad (2.8)$$

Результати розрахунків, виконаних за формулами (2.1)–(2.6), наведено в табл. 2.1–2.2.

Таблиця 2.1. Результати розрахунків енергетичних показників за «пікового» графіку руху поїзда

Досліджувана ділянка	Номінальне/максимальне завантаження поїзда					
	$A_{\text{тяги}}$, кВт·год	$A_{\text{рек}}$, кВт·год	A_R , кВт·год	$k_{\text{рек}}$	k_R	k_r
1	2	3	4	5	6	7
Лісова–Чернігівська	12,28/14,6	3,29/2,32	5,21/7,74	0,27/0,16	0,61/0,77	0,42/0,53
Чернігівська–Дарниця	15,34/15,92	4,94/3,57	1,33/4,1	0,32/0,22	0,21/0,53	0,09/0,26
Дарниця–Лівобережна	13,65/13,63	3,4/3,56	2,67/3,09	0,25/0,26	0,44/0,46	0,2/0,23
Лівобережна–Гідропарк	14,26/18,68	5,03/3,63	3,56/6,88	0,35/0,19	0,41/0,65	0,25/0,37
Гідропарк–Дніпро	23,71/23,52	5,25/3,14	3,04/4,93	0,22/0,13	0,37/0,61	0,13/0,21
Дніпро–Арсенальна	3,38/2,28	4,28/3,21	4,17/5,01	1,27/1,41	0,49/0,61	1,23/2,2
Арсенальна–Хрещатик	13,92/13,94	1,49/1,82	3,1/5,05	0,11/0,13	0,68/0,74	0,22/0,36
Хрещатик–Театральна	11,06/14,18	3,77/1,84	1,52/5,85	0,34/0,13	0,29/0,76	0,14/0,41
Театральна–Університет	11,3/13,55	2,79/2,4	0,85/3,02	0,25/0,18	0,23/0,45	0,08/0,22
Університет–Вокзальна	9,3/14,45	2,94/0,95	0,21/5,59	0,32/0,07	0,07/0,85	0,02/0,39
Вокзальна–КПП	14,4/20,53	0,88/2,1	2,1/4,38	0,06/0,1	0,7/0,68	0,15/0,21
КПП–Шулявська	15,78/18,37	3,76/4,46	0,68/2,85	0,24/0,24	0,15/0,4	0,04/0,16

Кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі та виділеної на гальмівних резисторах електроенергії, а також їх відношення під час експлуатації рухомого складу метрополітену для заданих штатних умов, зображено у вигляді діаграм на рис. 2.5–2.6.

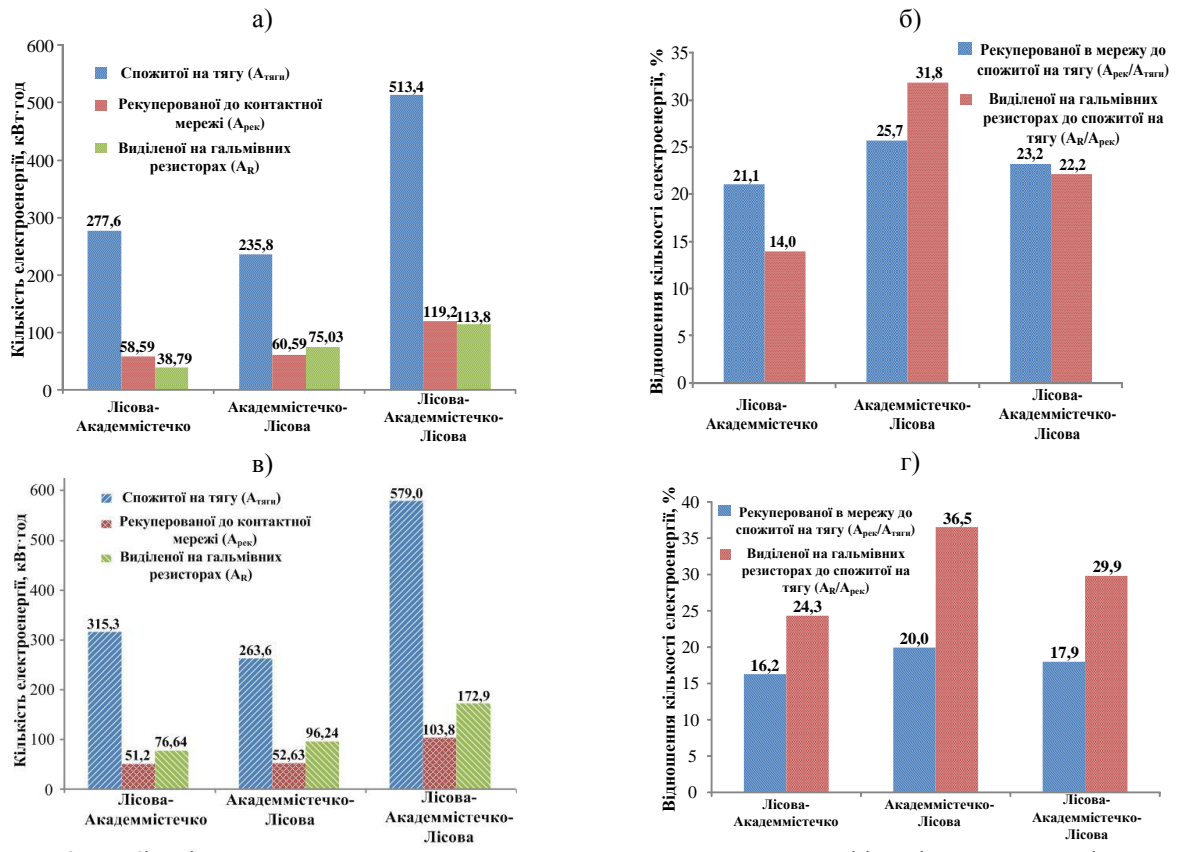
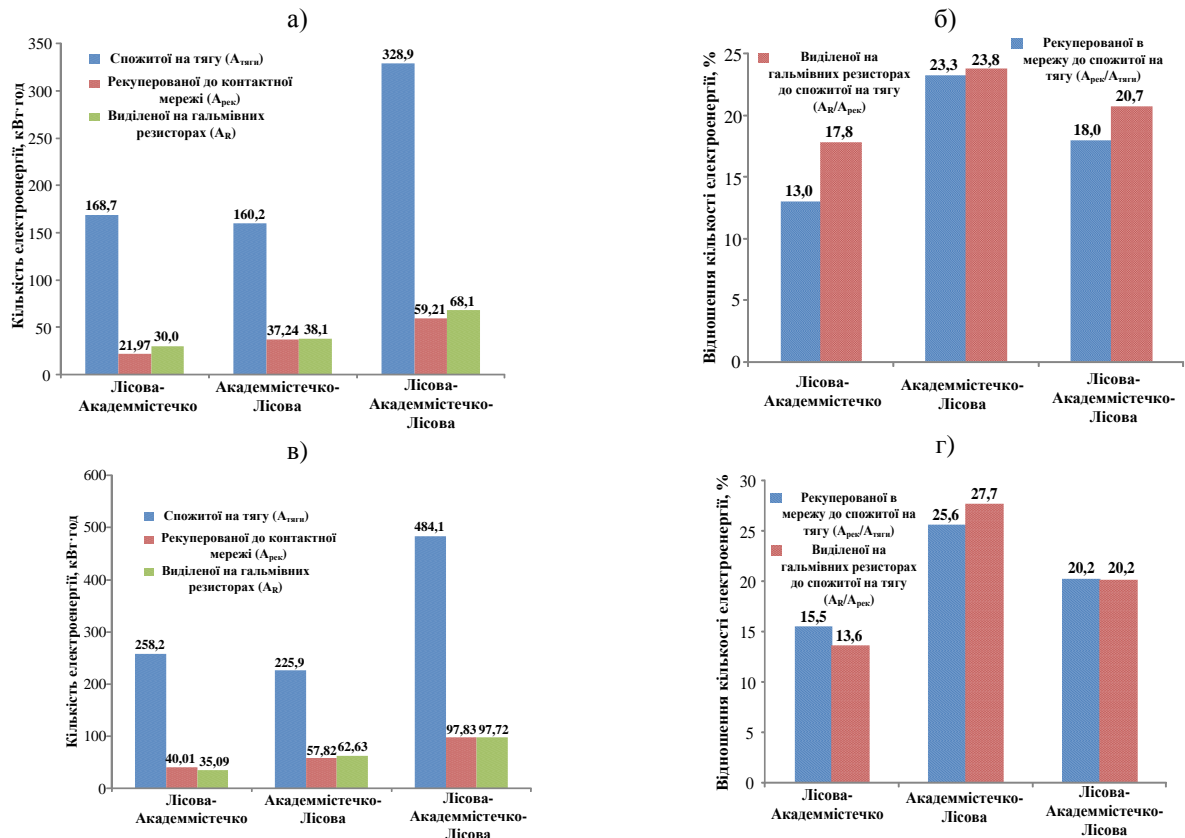


Рис. 2.5 – Кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії (а, в) та їх відношення (б, г) під час «пікового» графіку руху поїзда відповідно з номінальним та максимальним завантаженням



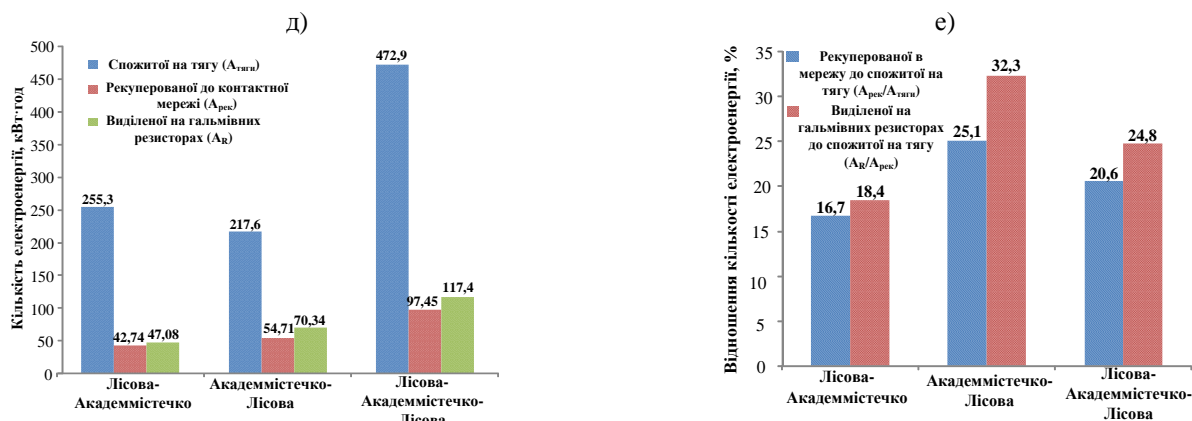


Рис. 2.6 – Кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії (а, в, д) та їх відношення (б, г, е) під час «непікового» графіку руху поїзда відповідно з мінімальним, номінальним та максимальним завантаженням

Результати розрахунків питомих витрат на тягу для штатних режимів експлуатації поїзда, виконаних за формулами (2.7), (2.8), приведено в табл. 2.3, 2.4.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунків питомих витрат на тягу під час «пікового» графіку руху поїзда

Досліджувана ділянка	Завантаження поїзда			
	Номінальне		Максимальне	
	$a_{пит.}$, Вт·год/т·км	$a_{пит.рек.}$, Вт·год/т·км	$a_{пит.}$, Вт·год/т·км	$a_{пит.рек.}$, Вт·год/т·км
Лісова–Академістечко	48,8	38,47	53,63	45,01
Академістечко–Лісова	43,16	32,45	41,02	32,18
Лісова–Академістечко–Лісова	45,29	34,76	48,96	40,22

Таблиця 2.4 – Результати розрахунків питомих витрат на тягу під час «непікового» графіку руху поїзда

Досліджувана ділянка	Завантаження поїзда					
	Мінімальне		Номінальне		Максимальне	
	$a_{пит.}$, Вт·год/т·км	$a_{пит.рек.}$, Вт·год/т·км	$a_{пит.}$, Вт·год/т·км	$a_{пит.рек.}$, Вт·год/т·км	$a_{пит.}$, Вт·год/т·км	$a_{пит.рек.}$, Вт·год/т·км
Лісова–Академістечко	52,77	45,22	45,88	38,78	45,39	37,86
Академістечко–Лісова	45,64	34,82	39,69	29,76	36,21	27,07
Лісова–Академістечко–Лісова	48,15	39,56	43,13	35,06	39,91	31,76

Виконаний аналіз результатів досліджень для заданих штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену дозволив встановити наступне:

– максимальна кількість спожитої електроенергії ($A_{тяги}$) спостерігається на перегоні з затяжним підйомом 42 % «Шулявська–Берестейська», мінімальна – на перегонах зі спусками «Дніпро–Арсенальна» (30 %) та «Житомирська–Академістечко» (38 %) (табл. 2.1–2.2);

– найбільшу кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі ($A_{рек}$) та надлишкової електроенергії (A_R) зафіксовано на перегоні з затяжним спуском 42 % «Берестейська–Шулявська» (табл. 2.1–2.2);

– найменшу кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі ($A_{рек}$) зафіксовано на перегоні «Святошин– Нивки» під час експлуатації поїзда з дотриманням «непікового» графіку руху з мінімальною завантаженістю вагонів (табл. 2.1–2.2);

– мінімальне значення кількості надлишкової електроенергії (A_R) зафіксоване на перегоні «Шулявська–Берестейська» під час експлуатації поїзда з дотриманням «пікового» графіку руху з номінальною завантаженістю вагонів (табл. 2.1–2.2);

– під час експлуатації поїзда між кінцевими станціями «Лісова–Академістечко–Лісова» залежно від штатної умови руху кількість спожитої електроенергії на тягу змінюється в межах (328,9–579,0) кВт·год, кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі – в діапазоні (59,21–119,2) кВт·год, кількість надлишкової електроенергії, що розсіюється на резисторах у вигляді теплоти – в межах (68,1–172,9) кВт·год (рис. 2.5–2.6). Отже, впровадження систем рекуперації на рухомому складі дозволяє повернути в контактну мережу від 17,9 % до 23,2 % електроенергії, що споживається на тягу (рис. 2.5–2.6), а також завдяки цим системам з'являються резерви енергозбереження за рахунок ефективного використання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування на рівні (20,2–29,9) %, що споживається на тягу (рис. 2.5–2.6). Але при цьому залишається невідомим, яка частина поверненої електроенергії в контактну мережу під час рекуперативного гальмування поїзда корисно

використовується іншими поїздами, а яка перетворюється у теплоту на шинах під час транспортування та резисторах на тягових підстанціях за відсутності споживачів.

– найбільші резерви енергозбереження спостерігаються під час «пікового» графіку руху з максимальною завантаженістю вагонів; найменші – при «непіковому» графіку руху за мінімального завантаження вагонів (рис. 2.5–2.6);

– максимальне значення питомих витрат електроенергії на тягу без та з урахуванням електроенергії рекуперації зафіксовано під час дотримання «пікового» графіку руху з максимальною завантаженістю вагонів; мінімальне – під час дотримання «непікового» графіку руху з максимальною завантаженістю вагонів (табл. 2.3–2.4).

2.3 Визначення найбільш вагомого фактору впливу на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії

Як було вказано раніше, на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії і, відповідно, на коефіцієнти рекуперації і кількість невикористаної (надлишкової) електроенергії в основному впливають такі фактори як профіль колії, графік руху (експлуатаційна швидкість), відстань між станціями, завантаженість вагонів. За результатами аналізу досліджень [186, 187] для заданих штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену виявлено, що мінімальна та максимальна кількість спожитої і рекуперованої електроенергії спостерігається під час руху поїзда на перегонах з затяжними ухилами. Однак цей аналіз не дозволяє відповісти на питання, який з зазначених факторів чинить найбільший вплив на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії. Тому для визначення найбільш вагомого фактору впливу отримані дані було піддано додатковому детальному аналізу.

Вагомість впливу того чи іншого фактору запропоновано здійснювати за допомогою коефіцієнта, який визначається як відношення загальної кількості електроенергії рекуперації під час гальмування до кількості електроенергії спожитої на тягу. Як критерій оцінки обрано різницю, Q , між зазначеними коефіцієнтами за умови, що три фактори є незмінними, а один – змінний [188] згідно із (2.9):

$$Q = \left| \frac{(A_{рек1} + A_{R1})}{A_{тяги1}} - \frac{(A_{рек2} + A_{R2})}{A_{тяги2}} \right| = |k_{\alpha1} - k_{\alpha2}| \quad (2.9)$$

Фактор впливу вважається найбільшим для тієї умови, за якою спостерігається максимальна різниця між вищевказаними коефіцієнтами, і, навпаки, фактор впливу мінімальний – для мінімального значення критерію.

Результати аналізу факторів, які впливають на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії, зображено в табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Результати аналізу факторів впливу

Досліджувана ділянка	Незмінні умови	$A_{тяги}$, кВт·год	$(A_{рек} + A_R)$, кВт·год	$k_{\alpha} = (A_{рек} + A_R) / A_{тяги}$
1	2	3	4	5
Змінна умова – профіль колії				
№ 1 Університет–Вокзальна Берестейська–Нивки	$S=1035$ м; $V_{сер.екс}=40$ км/год; $m=248,7$ т – номінальна завантаженість	8,47 11,97	3,01 7,16	0,36 0,6
№ 2 Дніпро–Арсенальна Арсенальна–Дніпро	$S=902$ м; $V_{сер.екс}=33$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	3,48 23,13	8,97 4,57	2,58 0,2
№ 3 Гідропарк–Лівобережна Лівобережна–Гідропарк	$S=1640$ м; $V_{сер.екс}=44$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	9,8 15,07	5,93 4,66	0,61 0,31
№ 4 КПП–Вокзальна Берестейська–Шулявська	$S=2230$ м; $V_{сер.екс}=48$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	15,21 5,11	5,00 45,93	0,33 8,99
№ 5 Нивки–Берестейська Вокзальна–Університет	$S=1035$ м; $V_{сер.екс}=39$ км/год; $m=248,7$ т – номінальна завантаженість	11,43 8,04	5,44 2,33	0,48 0,29
Змінна умова – графік руху (експлуатаційна швидкість)				
№ 1 Лісова–Чернігівська	$S=1217$ м; профіль колії; $m=262$ т – максимальна завантаженість	8,46 14,6	5,33 10,06	0,63 0,69
№ 2 Дарниця–Лівобережна	$S=1115$ м; профіль колії; $m=262$ т – максимальна завантаженість	8,98 10,48	3,49 2,7	0,39 0,26
№ 3 Лівобережна–Гідропарк	$S=1640$ м; профіль колії; $m=262$ т – максимальна завантаженість	9,8 18,68	5,93 10,51	0,61 0,56
№ 4 Шулявська–Берестейська	$S=2230$ м; профіль колії; $m=248,7$ т – номінальна завантаженість	79,27 78,21	3,51 4,29	0,04 0,05

Кінець таблиці 2.5.

1	2	3	4	5
Змінна умова – відстань між станціями				
№ 1 Чернігівська–Дарниця Нивки–Святошин	профіль колії; $V_{сер.екс}=39$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	11,11 13,69	4,1 3,76	0,37 0,27
№ 2 Лісова–Чернігівська Святошин–Нивки	профіль колії; $V_{сер.екс}=38$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	8,46 8,47	5,33 6,46	0,63 0,76
№ 3 Лівобережна–Гідропарк Вокзальна–КПП	профіль колії; $V_{сер.екс}=50$ км/год; $m=248,7$ т – номінальна завантаженість	15,24 16,19	4,18 4,76	0,27 0,29
№ 4 Університет–Вокзальна КПП–Вокзальна	профіль колії; $V_{сер.екс}=47$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	14,45 16,2	6,54 6,35	0,45 0,39
№ 5 Хрещатик–Театральна Дарниця–Чернігівська	профіль колії; $V_{сер.екс}=41$ км/год; $m=262$ т – максимальна завантаженість	14,18 11,00	7,69 5,19	0,54 0,47
Змінна умова – завантаженість вагонів				
№ 1 Чернігівська–Дарниця	$S=1315$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=38$ км/год	10,48 11,11	2,7 4,1	0,26 0,37
№ 2 Арсенальна–Хрещатик	$S=1666$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=46$ км/год	12,03 12,77	4,49 4,89	0,37 0,38
№ 3 Вокзальна–КПП	$S=2230$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=51$ км/год	16,19 16,75	4,76 4,74	0,29 0,28
№ 4 Житомирська–Академмістечко	$S=1445$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=39$ км/год	2,63 2,88	2,44 3,1	0,93 1,08
№ 5 Чернігівська–Лісова	$S=1218$ м; профіль колії; $V_{сер.екс}=41$ км/год	14,99 11,83	2,72 3,4	0,18 0,29

На рис. 2.7 зображено отримані значення критерію для чотирьох змінних умов за п'ятьма окремими дослідженнями для кожної умови.

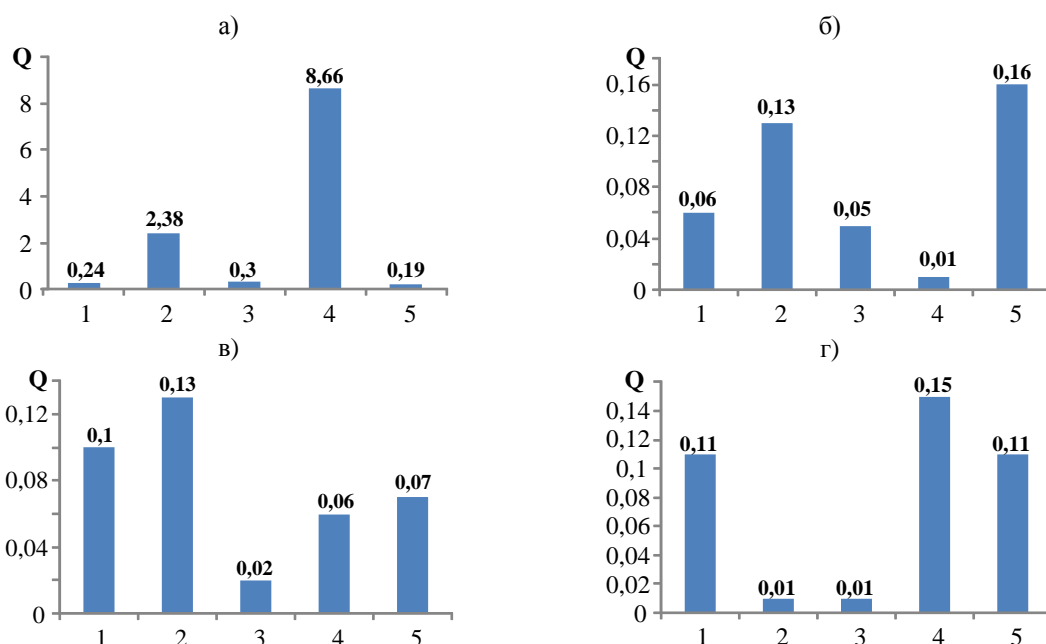


Рис. 2.7 – Значення критерію за умови зміни профілю колії (а), графіку руху (експлуатаційної швидкості) (б), відстані між станціями (в), завантаженості вагонів (г)

За результатами аналізу даних, які наведено в табл. 2.5 та зображено на графіках рис. 2.7, встановлено:

– найбільш вагомим фактором, що впливає на кількість спожитої та загальну кількість рекуперованої електроенергії, є профіль колії; інші фактори (експлуатаційна швидкість, відстань між станціями, завантаженість) є менш вагомими та мають практично однаковий вплив;

– різниця між відношеннями кількості загальної рекуперованої до кількості спожитої електроенергії залежно від характеру зміни профілю колії змінюється в межах від 0,19 до 8,66; експлуатаційної швидкості – в межах від 0,01 до 0,16; відстані між станціями – в межах від 0,02 до 0,13; завантаженості – в межах від 0,01 до 0,15.

Також додатково виконано дослідження з визначення впливу різних факторів на кількість електроенергії, яка споживається на тягу та виділяється під час рекуперативного гальмування, за методом планування експерименту. В якості факторів впливу було обрано наступні: профіль колії, графік руху (експлуатаційна швидкість), завантаженість вагонів [189].

Метод планування експерименту застосовано для побудови математичної моделі у вигляді регресійного рівняння, яке визначає вплив кожного фактору за допомогою коефіцієнтів регресії і встановлює взаємозв'язки між ними, а також дозволяє визначити найбільш вагомий фактор. Дослідження за методом планування експерименту передбачає такі етапи: встановлення вагомих факторів, побудова матриці експерименту, проведення дослідів, обчислення дисперсії, перевірка адекватності дисперсій, визначення коефіцієнтів регресії і власне отримання рівнянь регресії. Як вагомі фактори експерименту прийнято: профіль колії – x_1 ; графік руху (експлуатаційна швидкість) – x_2 ; завантаження поїзда – x_3 . Під час проведення експерименту обрано два рівні зміни параметрів: профіль колії з наявністю «шкідливих» ухилів (+) та відносно рівні площадки (-), «непіковий» (+) та «піковий» (-) графіки руху, а також номінальне (+) та максимальне (-) завантаження вагонів. Відповідно до цього будується матриця експерименту за рівнянням (2.10):

$$M = p^q = 2^3 = 8, \quad (2.10)$$

де p – кількість рівнів зміни параметрів;

q – кількість значущих факторів.

Дисперсія в кожному досліді обчислюється за виразом (2.11) [190, 191]:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_n - \bar{y})^2}{k-1}, \quad (2.11)$$

де k – кількість повторень у досліді;

n – порядковий номер досліді;

\bar{y} – середнє значення контрольованого параметра.

Перевірка гіпотези щодо однорідності дисперсій здійснюється за критерієм Кохрена за відношенням (2.12) [190, 191]:

$$G_{\max} = \frac{S_{\max}^2}{\sum S^2}. \quad (2.12)$$

Табличне значення критерію Кохрена визначається залежно від числа ступенів свободи ($G_{\text{табл}}$). Якщо $G_{\max} < G_{\text{табл}}$, то експеримент виконаний зі статично однаковою точністю і далі можна визначити коефіцієнти рівняння регресії.

Вільний член рівняння регресії визначається як a_0 за формулою (2.13):

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^M y_i}{M}, \quad (2.13)$$

де y_i – вихідні параметри для i -го впливу.

Коефіцієнти регресії, що характеризують вплив факторів визначаються за виразом (2.14) [190, 191]:

$$a_{i,j} = \frac{\sum_{i,j=1}^M x_{iq} \cdot x_{jq} \cdot \bar{y}_i}{M}. \quad (2.14)$$

Матрицю експерименту для заданих умов зображено у табл. 2.6–2.7. Як ділянку з наявним «шкідливим» ухилом обрано – ділянку «Шулявська–Берестейська–Шулявська», як ділянку з відносно рівною площадкою – «Хрещатик–Театральна–Хрещатик».

Таблиця 2.6 – Матриця експерименту для показника кількості спожитої електроенергії на тягу

Досліджувана ділянка	x_1	x_2	x_3	$A_{\text{тяги}}, \text{кВт} \cdot \text{год}$				S^2
				y_1	y_2	y_3	\bar{y}	
Шулявська–Берестейська–Шулявська	+	+	+	82,82	82,26	83,42	82,83	0,67
Шулявська–Берестейська–Шулявська	+	+	-	86,62	87,09	86,31	86,67	0,31
Шулявська–Берестейська–Шулявська	+	-	-	89,56	88,53	90,5	89,53	1,94
Хрещатик–Театральна–Хрещатик	-	-	-	26,47	27,69	28,35	27,5	1,82
Хрещатик–Театральна–Хрещатик	-	+	+	17,31	17,11	16,46	16,96	0,4
Шулявська–Берестейська–Шулявська	+	-	+	86,52	87,49	88,38	87,46	1,73
Хрещатик–Театральна–Хрещатик	-	-	+	20,99	21,09	20,64	20,91	0,11
Хрещатик–Театральна–Хрещатик	-	+	-	20,01	19,98	21,09	20,36	0,8
Σ								7,78
G_{\max}								0,25

Примітка. При числі ступенів свободи $f_1=k-1=2$; $f_2=M=8$ табличне значення критерію Кохрена дорівнює 0,63.

Таблиця 2.7 – Матриця експерименту для показника кількості електроенергії, яка генерується під час рекуперативного гальмування

Досліджувана ділянка	x ₁	x ₂	x ₃	A, кВт·год				S ²
				y ₁	y ₂	y ₃	\bar{y}	
Шулявська–Берестейська–Шулявська	+	+	+	49,95	48,69	50,43	49,69	1,62
Шулявська–Берестейська–Шулявська	+	+	–	48,65	50,99	48,36	49,33	4,16
Шулявська–Берестейська–Шулявська	+	–	–	48,9	49,39	49,26	49,18	0,13
Хрещатик–Театральна–Хрещатик	–	–	–	11,79	12,95	13,75	12,83	1,94
Хрещатик–Театральна–Хрещатик	–	+	+	6,21	6,67	6,14	6,34	0,17
Шулявська–Берестейська–Шулявська	+	–	+	51,07	50,72	50,42	50,74	0,21
Хрещатик–Театральна–Хрещатик	–	–	+	7,73	8,17	6,93	7,61	0,79
Хрещатик–Театральна–Хрещатик	–	+	–	8,29	9,00	9,11	8,80	0,40
Σ								9,41
G _{max}								0,44

Примітка. За числа ступенів свободи f₁=k–1=2; f₂=M=8 табличне значення критерію Кохрена дорівнює 0,63.

Регресійне рівняння з урахуванням заданих факторів впливу має наступний загальний вигляд відповідно до (2.15) [189]:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + a_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + a_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + a_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (2.15)$$

Результати розрахунку для заданих умов експлуатації поїзда вищезазначеним методом, виконаного за виразами (2.13)–(2.15), наведено в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Результати досліджень методом планування експерименту

A _{тяги} , кВт·год		A, кВт·год	
Регресійне рівняння	Найбільш вагомий фактор	Регресійне рівняння	Найбільш вагомий фактор
54,0+32,6·x ₁ -2,3·x ₂ -2,0·x ₃ +0,5·x ₁ ·x ₂ +0,5·x ₁ ·x ₃ +0,2·x ₂ ·x ₃ -0,6 x ₁ ·x ₂ ·x ₃	x ₁	29,3+20,4·x ₁ -0,8·x ₂ -0,7·x ₃ +0,6·x ₁ ·x ₂ +1,2·x ₁ ·x ₃ +0,2·x ₂ ·x ₃ -0,5 x ₁ ·x ₂ ·x ₃	x ₁

За результатами досліджень методом планування експерименту отримано математичні моделі визначення кількості електроенергії, що споживається на тягу та виділяється під час рекуперативного гальмування для заданих умов експлуатації. За аналізом цих досліджень визначено, що найбільш вагомим фактором впливу на кількість електроенергії, що споживається на тягу та виділяється під час рекуперативного гальмування, є профіль колії (фактор впливу є явно вираженим).

Висновки за розділом 2

1. Розроблена вимірювальна система для експериментального дослідження енергообмінних процесів між контактною мережею та рухомих складом метрополітену з системами рекуперації є універсальною та може застосовуватися для різних типів електрорухомого складу.

2. Аналіз результатів експериментально-розрахункових досліджень під час заданих типових умов експлуатації рухомого складу метрополітену між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії показав наступне:

– впровадження систем рекуперації на рухомому складі дозволяє повернути в контактну мережу на рівні 17,9–23,2 % електроенергії, що споживається на тягу. При цьому залишається невідомим, яка частина поверненої електроенергії в контактну мережу під час рекуперативного гальмування поїзда корисно використовується іншими поїздами;

– існують резерви підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену з системами рекуперації за рахунок ефективного використання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування кількість якої становить від 20,2 % до 29,9 %, що споживається на тягу.

3. Відповідно до оцінки, проведеної за введеним критерієм Q, та за методом планування експерименту із отриманням рівнянь регресії найбільш вагомим фактором, який здійснює вплив на кількість спожитої, рекуперованої до контактної мережі, а також надлишкової електроенергії, є профіль колії на перегоні.

Подальші дослідження необхідно зосередити на виборі раціонального типу бортового накопичувача енергії та визначенні його оптимальних параметрів для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, враховуючи реальні умови експлуатації останнього.

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Обґрунтування вибору ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації

Ще одним важливим фактором, від якого напряму залежить термін окупності системи накопичення в цілому, є правильний вибір типу накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації. Аналіз існуючих досліджень [81, 86, 98, 186] дозволив встановити, що дане питання залишається досить актуальним та розглядається у численних роботах як вітчизняних, так і іноземних дослідників. Отже, далі розглянемо питання вибору раціонального типу накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації.

Огляд численних досліджень [8, 9, 86, 98, 186] свідчить, що існують різні типи накопичувачів енергії. Із робіт [8, 186, 192, 193] відомо, що накопичувачі енергії класифікуються за різними ознаками: за фізичним принципом дії, за способом компенсації, за способом регулювання, за місцем розташування тощо. В існуючих дослідженнях найбільше використовують класифікацію накопичувачів енергії за фізичним принципом дії [8, 9, 79, 86, 98, 186]. Згідно з даною класифікацією основними типами накопичувачів є електрохімічні, індуктивні, ємнісні, механічні, електромеханічні, електродинамічні, пневматичні, гідро- та повітряокумулюючі накопичувачі [8, 9, 98, 170, 194]. Аналіз попередніх досліджень [19, 45, 75, 79, 81, 86, 98, 106, 107, 186, 195] дозволив встановити, що на залізничному транспорті з різко змінним навантаженням, зокрема в метрополітені, найбільшу перспективу мають електрохімічні (ЕХН), індуктивні (ІН), ємнісні (ЄН) та електромеханічні накопичувачі (ЕМН). Тому в подальшому розглянуто саме зазначені перспективні типи накопичувачів енергії.

Слід зазначити, що обґрунтування раціонального типу накопичувача енергії необхідно виконувати з урахуванням умов експлуатації рухомого складу метрополітену та порівняльного аналізу характеристик зазначених перспективних накопичувачів енергії.

Система енергозабезпечення (СЕ) метрополітенів є потужним енергоємним споживачем електроенергії першої категорії. Крім того, СЕ метрополітену є споживачем з нерівномірним графіком енергоспоживання. Нерівномірність споживання в СЕ обумовлена зміною добового графіку руху поїздів та імпульсним характером навантаження. Діаграму споживання струму з контактної мережі під час експлуатації рухомого складу метрополітену в штатному режимі на середньостатистичному перегоні, отримана експериментально за допомогою випробувального комплексу, наведено на рис. 3.1.

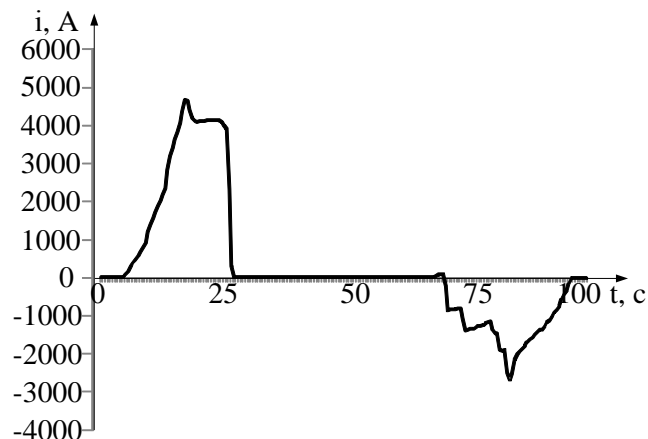


Рис. 3.1 – Діаграма споживання струму рухомим складом метрополітену

Тому, під час здійснення обґрунтування вибору раціонального типу накопичувача необхідно враховувати вищезазначені фактори. Слід зазначити, що окрім урахування графіку руху та імпульсного характеру навантаження поїздів метрополітену, необхідно виконувати порівняльний аналіз показників (характеристик) зазначених типів накопичувачів за різними критеріями оцінки [186]. В роботах [79, 195–197] запропоновано порівняльний аналіз різних типів накопичувачів здійснювати за їх енергетичними, часовими, технічними, експлуатаційними та економічними показниками.

Згідно з [196, 197] до основних енергетичних показників слід віднести технічну оптимальну енергоємність накопичувача, мінімальну та максимальну енергоємність, питому енергоємність або щільність енергії, мінімальну та максимальну потужність, питому потужність або щільність потужності; до часових показ-

ників – час збереження енергії, час зарядження/розрядження накопичувача; до технічних показників – коефіцієнт корисної дії (ККД) накопичувача, кількість циклів зарядження/розрядження, до експлуатаційних показників – строк служби (ресурс) накопичувача, діапазон робочих температур; до економічних показників – питомі капіталовкладення на одиницю енергоємності, питомі капіталовкладення на одиницю потужності, питомі експлуатаційні витрати. Показники технічної оптимальної енергоємності накопичувача, мінімальної та максимальної енергоємності, мінімальної та максимальної потужності, характеристики зарядження/розрядження накопичувача в значній мірі будуть залежати від умов експлуатації рухомого складу. Ці дослідження є окремим напрямком, який в даній роботі окремо розглянуто в подальшому. При цьому в даному розділі додатково виконано порівняльний аналіз накопичувачів за такими показниками: екологічність, шумність, технологія виготовлення, стійкість характеристик процесу заряду/розряду до зміни температури.

Для умов метрополітену обґрунтування раціонального типу бортових накопичувачів слід виконувати за таких вимог, які приведено в табл. 3.1. Слід зазначити, що на даний час діючої нормативної документації, в якій було б сформульовано вимоги до бортових накопичувачів енергії в метрополітені, не існує. Тому вимоги зазначені в табл. 3.1 мають довідково-рекомендаційний характер. В табл. 3.2, 3.3 наведено порівняльний аналіз ЕХН, ІН, ЄН, ЕМН за вищеперерахованими показниками.

Таблиця 3.1 – Вимоги до параметрів бортових накопичувачів енергії для умов метрополітену

Назва параметра	Вимоги
Питома енергоємність, Вт·год/кг	≥ 10
Питома потужність, кВт/кг	≥ 5
Час збереження енергії, год	0...24
Час зарядження/розрядження, с	0...300
Коефіцієнт корисної дії, %	≥ 85
Кількість циклів зарядження/розрядження	≥ 10 ⁶
Строк служби, років	≥ 20
Діапазон робочих температур, °С	-40...+50
Питомі капіталовкладення на одиницю енергоємності, \$/кВт·год	≤ 1000
Питомі капіталовкладення на одиницю потужності, \$/кВт	≤ 700
Питомі загальні витрати, \$/рік *	≤ 2,5·10 ⁴
Екологічність	Нетоксичні, безпечні
Шумність	Малощумні (не збільшують рівень фону при роботі на поїзді)
Технологія виготовлення	Проста, серійна
Стійкість характеристик заряду та розряду до зміни температури	Стійкі

*Примітка. Вимоги до питомих загальних витрат наведено для номінальної потужності накопичувача 500 кВт, енергоємності – 10 кВт·год та без урахування витрат на його утилізацію.

Таблиця 3.2 – Порівняльний аналіз накопичувачів енергії за енергетичними, часовими, технічними та експлуатаційними показниками

Тип накопичувача	Енергетичні показники		Часові показники		Технічні показники		Експлуатаційні показники	
	Питома енергоємність, Вт·год/кг	Питома потужність, кВт/кг	Час саморозряду, % за місяць	Час заряду/розряду енергії, с	ККД, %	Кількість циклів заряду/розряду	Термін служби, років	Діапазон робочих температур, °С
ЕХН:								
- кислотні;	10-60	0,02-0,4	3-20	1-10 ⁵	70-85	125-1200	2-5	-30...+45
- нікель-кадмієві;	15-80	0,1-1,3	20	1-10 ⁵	60-80	300-2800	2-15	-40...+60
- натрій-сірчані;	80-160	0,03-0,5	≤ 2	1-10 ⁵	81-85	800-4000	3-15	+250...+300
- літій-іонні	80-220	0,1-3,0	≤ 5	1-10 ⁵	80-96	1200-5500	5-15	-30...+60
ІН:								
- традиційні;	0,3-3	0,1-10	250-350	10 ⁻³ -10	80-90	≥ 105	≥ 20	-30...+50
- надпровідні (СПІН)	3-15	0,1-15	200-300	10 ⁻² -102	85-95	≥ 105	≥ 20	-30...+65
ЄН:								
- традиційні конденсаторні;	0,05-0,2	0,2-15	≤ 65	10-4-10-2	80-90	≥ 106	≥ 20	-30...+70
- іоністори (суперконденсатори)	1-20	0,2-12	1-300	10-3-102	80-98	≥ 106	≥ 20	-50...+70
ЕМН:								
- інерційні маховики зі сталі;	0,5-20	0,02-10	300-420	10-2-10	85-97	≥ 106	≥ 20	-40...+50
- супермаховики	100-300	0,5-10	300-380	10-2-10	88-97	≥ 106	≥ 20	-40...+50

Таблиця 3.3 – Порівняльний аналіз накопичувачів енергії за економічними показниками, екологічністю, шумністю, технологією виготовлення, стійкістю характеристик заряду/розряду до зміни температури

Тип накопичувача	Економічні показники			Екологічність	Шумність	Технологія виготовлення	Стійкість характеристик зарядження/розрядження до зміни температури
	Питомі капіталовкладення на одиницю енергоємності, \$/кВт·год	Питомі капіталовкладення на одиницю потужності, \$/кВт	Питомі загальні витрати, \$/рік*				
ЕХН: - кислотні; - нікель-кадмієві; - натрій-сірчани; - літій-іонні	50-1100 500-2300 230-950 650-5000	50-850 75-1400 1000-2700 400-3800	$1,52 \cdot 10^5$ $7,17 \cdot 10^4$ $1,74 \cdot 10^5$ $1,35 \cdot 10^5$	Небезпечні Токсичні Нетоксичні Нетоксичні	Малошумні Малошумні Малошумні Малошумні	Проста, серійна Проста, серійна Складна, серійна Складна, серійна	Нестійкі Нестійкі Нестійкі Нестійкі
ІН: - традиційні; - надпровідні (СПН)	120-4300 500-8100	80-1300 1100-3700	$1,47 \cdot 10^4$ $4,97 \cdot 10^4$	Нетоксичні Нетоксичні	Малошумні Малошумні	Проста, серійна Складна, дослідні зразки	Стійкі Стійкі
ЄН: - традиційні конденсаторні; - іоністори (суперконденсатори)	$10^6-2 \cdot 10^6$ 85-5700	100-1250 10-650	$6,14 \cdot 10^5$ $0,78 \cdot 10^4$	Нетоксичні Екологічно безпечні	Малошумні Малошумні	Проста, серійна Проста, серійна	Стійкі Стійкі
ЕМН: - інерційні маховики зі сталі; - супермаховики	40-630 350-10200	280-1200 1350-5100	$2,12 \cdot 10^4$ $9,45 \cdot 10^4$	Нетоксичні Нетоксичні	Шумні Шумні	Проста, серійна Складна, дослідні зразки	Стійкі Стійкі
*Примітка. Питомі експлуатаційні витрати розраховано з урахуванням наступних прийнятих умов: нормативний строк служби вагонів складає 30 років; вартість обслуговування протягом строку служби накопичувачів: кислотних ЕХН дорівнює їх купівельній вартості; нікель-кадмієвих – 20 %; натрій-сірчаних – 20 %; літій-іонні, ІН, ЄН – не потребують спеціального обслуговування; ЕМН – 50 %.							

Таким чином, за строк служби вагона метрополітену, який складає 30 років необхідна кількість комплектів кислотних ЕХН складає 9, нікель-кадмієвих – 4, натрій-сірчаних – 4, літій-іонних – 3, інших накопичувачів (ІН, ЄН, ЕМН) – 1.

З даних, наведених в табл. 3.2, 3.3 видно, що кожний тип накопичувача енергії має свої переваги і недоліки. Враховуючи вимоги, що висуваються до параметрів накопичувача (табл. 3.1) можна відмітити наступне:

– ЕХН малошумні, можуть запасати значну кількість електроенергії, однак мають малий ресурс, низький ККД, значні масогабаритні показники. Найбільшу перспективу мають літій-іонні ЕХН, оскільки не потребують обслуговування, нетоксичні, мають більшу кількість циклів зарядження/розрядження у порівнянні з кислотними та лужними. Однак їх вартість на даний час залишається достатньо високою;

– ІН, зокрема і СПН, не потребують обслуговування, мають значний ресурс, широкий діапазон робочих температур, високий ККД, нетоксичні, малошумні, однак мають низьку питому енергоємність та значну вартість;

– ЄН не потребують обслуговування, мають значний ресурс, широкий діапазон робочих температур, високий ККД, безпечні, малошумні, порівняно маловартісні, однак мають низьку питому енергоємність. Іоністори мають більшу питому енергоємність у порівнянні з традиційними конденсаторами;

– ЕМН мають значний ресурс, широкий діапазон робочих температур, мають високу питому енергоємність, нетоксичні, високий ККД, однак мають середні масогабаритні показники, шумні, потребують спеціального обслуговування. Супермаховики мають високий показник питомої енергоємності у порівнянні з інерційними маховиками зі сталі за рахунок використання композитних матеріалів та специфічної технології виготовлення, однак їх вартість перевищує вартість інерційних маховиків зі сталі в декілька раз.

Таким чином, з наведеного порівняльного аналізу однозначно відповісти, який з обраних, як перспективні, накопичувачів є раціональним, неможливо. Тому далі запропоновано підхід щодо визначення раціонального типу накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену за бальною шкалою оцінки.

Суть запропонованого підходу полягає у наступному: відповідно до вимог для кожного показника визначаються бали (оцінка показника залежно від його значимості у порівнянні з іншими показниками), за розробленими критеріями оцінки для кожного типу накопичувача енергії визначається загальна кількість балів та обирається раціональний тип накопичувача енергії за максимальною кількістю балів. Таким чином, запропоновано підхід визначення раціонального типу накопичувача за бальною шкалою оцінки шляхом застосування вагових коефіцієнтів для встановлених показників.

В даному випадку прийнято, що значимість показників однакова, тому для кожного показника у разі його відповідності вимогам ставиться один бал, за умов невідповідності – бал не ставиться. Тобто ваговий коефіцієнт для кожного показника прийнято рівним одиниці. З урахуванням прийнятих умов оцінки максимальна кількість балів складає 15. Для питомої енергоємності та потужності, ККД, питомих капіталовкладень на одиницю енергоємності та потужності бал нараховується за середнім значенням даних показників. Результати визначення балів для перспективних типів накопичувачів енергії за умов їх впровадження в метрополітені наведено у вигляді діаграм на рис. 3.2.

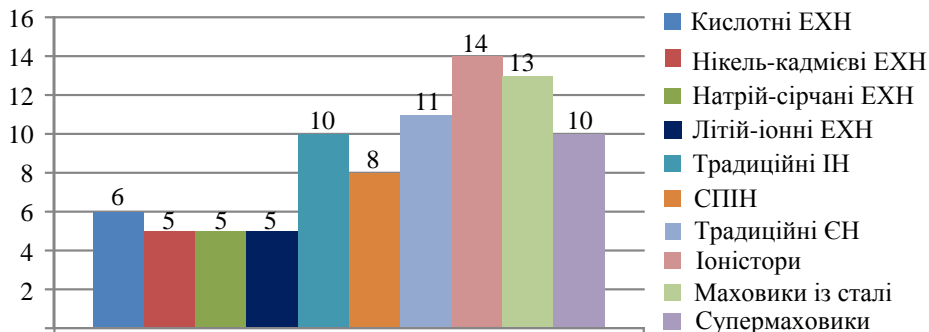


Рис. 3.2 – Результати оцінки накопичувачів за бальною шкалою

Таким чином, за допомогою запропонованого підходу встановлено, що іоністори мають максимальний бал та найбільше відповідають зазначеним вимогам, тобто для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації раціональним є використання ЄН. Серед основних недоліків використання іоністорів (суперконденсаторів) є їх низька питома енергоємність, високі показники саморозряду та значні капіталовкладення на одиницю енергоємності, неприпустимість зниження напруги нижче допустимого рівня. Крім того, іоністори виготовляються на низьку напругу, тому для отримання необхідної напруги потрібне послідовне підключення декількох елементів. Однак сучасні розробки технологічного виготовлення іоністорів передбачають заміну традиційних електродів із активованого вугілля на вуглеводні нанотрубки, що дозволить виготовляти іоністори на високу напругу та із значною питомою енергоємністю (близько 300 Вт·год/кг). Для умов метрополітену показник саморозряду не має принципового значення, оскільки згідно з вимогами час зберігання електроенергії складає до 24 годин. Отже, в найближчий час передбачається покращення характеристик іоністорів завдяки зміні технології їх виготовлення. Як наслідок, вищезазначені недоліки не будуть мати принципового характеру.

На даний час у світі основними виробниками іоністорів (суперконденсаторів) є Maxwell Technologies (США), Panasonic (Японія), NEC-Tokin (Японія), Cooper Electronic Technologies (США), Nesscap Energy (Південна Корея), SAFT (Франція), Vat Scap (Франція), Epcos (Німеччина); в Російській Федерації – ЗАТ «ЕСМА», НВО «Еконд», ЗАТ «Еліт», ВАТ «Енергія», ЗАТ «Елтон», ООО «Технокор», в Україні – Yunasko. На даний момент в Україні розробкою дослідних зразків іоністорів займається багато наукових установ та компаній (інститут неорганічної хімії імені Вернадського, фірма KM-Labs та інші), тому в найближчий час потрібно сподіватись на появу конкуренції в зазначеній сфері та, як наслідок, зниження їх вартості.

Зовнішній вигляд іоністорів (суперконденсаторів) виробництва Maxwell Technologies та ЗАТ «Елтон», зображено на рис. 3.3. Діаграми обігу світового ринку іоністорів за роками в різних галузях промисловості, зображено на рис. 3.4.



Рис. 3.3 – Зовнішній вигляд іоністорів (суперконденсаторів) виробництва Maxwell Technologies (а) та ЗАТ «Елтон» (б)

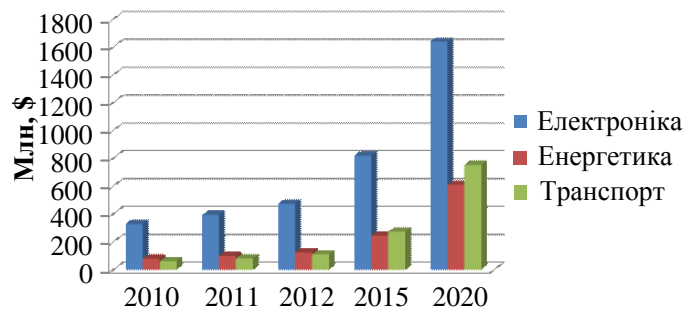


Рис. 3.4 – Діаграми обігу іоністорів на світовому ринку в грошовому еквіваленті за роками

Щорічний темп розвитку іоністорів в сфері електроніки складає близько 20 %, енергетики – (20-30) %, транспорту – близько 35 % (рис. 3.4).

Переваги впровадження ЄН в метрополітені:

- головними перевагами використання ЄН є порівняно невисока ціна, надійність, значний ресурс, широкий діапазон робочих температур, високий ККД, екологічність, не потребують технічного обслуговування;

- ЄН орієнтовані на імпульсне навантаження, а метрополітен як раз і є таким споживачем енергії;

- очікується зменшення вартості ЄН за рахунок масового серійного виробництва та збільшення значення питомої енергоємності внаслідок удосконалення технології виробництва;

- щорічний темп розвитку іоністорів в сфері електроніки складає близько 20 %, енергетики – (20-30) %, транспорту – близько 35 %;

- серед додаткових переваг є вібростійкість, низький внутрішній опір, відсутність небезпеки перегрівання, характерного для ЕХН, мінімальні зміни технічних характеристик за низьких та високих температурах навколишнього середовища.

Подальші дослідження необхідно зосередити на визначенні необхідних величин потужності та енергоємності бортових накопичувачів енергії з урахуванням реальних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації.

3.2 Розробка підходів до визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії з використанням методів теорії імовірності

Одним з ключових і недостатньо вивчених питань за умов впровадження бортових ЄНЕ в метрополітені залишається вибір їх параметрів, в першу чергу, потужності та енергоємності. Найбільш простим технічним рішенням в цьому напрямку є розміщення бортового ЄНЕ значної потужності та енергоємності, здатного накопичувати, зберігати та акумулювати повний об'єм електроенергії рекуперативного гальмування поїзда [180, 181]. За аналізом існуючих досліджень [103, 113, 198] відомо, що в реальних умовах експлуатації поїзда метрополітену не завжди є доцільним застосування бортових ЄНЕ значної потужності та енергоємності. Основні фактори, які стримують та обмежують впровадження бортових ЄНЕ значної потужності та енергоємності є вартісні та масогабаритні показники. Отже, враховуючи сучасні технологічні можливості виробництва ЄНЕ, на даний час найбільш доцільним виглядає впровадження технічних рішень, за яких застосовуються системи накопичення незначної потужності та енергоємності [12, 199].

В наявних дослідженнях [49, 103, 113, 200] параметри бортового ЄНЕ визначають за оцінкою кількості кінетичної енергії поїзда. Суть даного підходу полягає у здійсненні вибору параметрів бортового ЄНЕ за залежністю кількості енергії рекуперативного гальмування поїзда від швидкості початку гальмування. Така оцінка є досить грубою і не враховує низки чинників, зокрема реальних умов експлуатації поїзда метрополітену на заданій ділянці (профілю колії, завантаженості, графіку руху, сили гальмування, наявності електропневматичного гальмування тощо).

В роботах [76, 201] запропоновано визначати параметри бортового ЄНЕ в режимі обмеження споживання струму тягової мережі. Підхід в роботі [76] базується на визначенні параметрів за характеристиками роботи тягового асинхронного приводу електрорухомого складу. При цьому даний спосіб передбачає використання основних положень теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування. Недоліками даного способу оцінки є те, що не враховано профіль колії, графік руху, наявність електропневматичного гальмування. В роботі [201] сформульовано алгоритм розрахунку необхідної енергоємності БНЕ для конкретного графіка навантаження. Суть алгоритму полягає у визначенні номінальної потужності та необхідної енергоємності бортового ЄНЕ чисельними методами інтегрування за динамікою споживання електроенергії. Недоліком цього способу є те, що враховано тільки один штатний циклічний режим руху, однак конкретний графік передбачає врахування реальних штатних умов експлуатації.

В дослідженні [86] параметри бортового СНЕ запропоновано визначати шляхом використання основних положень теорії ймовірності. Основна ідея цього методу полягає у визначенні за аналізом характеристик щільності розподілу електроенергії рекуперативного гальмування. Побудова характеристик (гістограм) виконується за результатами обробки осцилограм і масивів даних, отриманих експериментально за штатних умов експлуатації рухомого складу на заданій ділянці. Основною перевагою цього методу від вищенаведених є врахування реальних умов експлуатації (профілю колії, завантаженості, сили гальмування тощо). Однак метод щодо вибору параметрів бортових СНЕ в дослідженні [86] не враховує ряд важливих факторів: обмежена кількість визначених параметрів, за якими обираються бортові СНЕ; вибір бортових СНЕ здійснюється лише за середнім значенням і не залежить від закону розподілу кількості електроенергії рекуперації; відсутнє врахування добових умов експлуатації, характерних для рухомого складу метрополітену.

Тому, в цій роботі запропоновано удосконалити існуючий метод та процедуру вибору параметрів бортових СНЕ, заснованих на використанні основних положень теорії ймовірності, шляхом розширення функціоналу в частині можливості визначення таких важливих параметрів як номінальна та максимальна потужність, загальна енергоємність; врахування особливостей та добових умов експлуатації рухомого складу метрополітену; врахування вибору критеріїв оцінки робочої енергоємності бортового СНЕ залежно від отриманого закону розподілу кількості електроенергії рекуперації; врахування в розрахунках значень, що не потрапляють в довірчий інтервал під час побудови гістограм, автоматизації етапів досліджень.

Далі в роботі розглянуто розроблені підходи щодо визначення необхідних параметрів бортових СНЕ для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, що дозволяють враховувати особливості добових умов експлуатації на заданих ділянках колії саме даного типу рухомого складу. Основна ідея запропонованих підходів полягає у визначенні параметрів бортового СНЕ з використанням основних положень теорії ймовірності за аналізом характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперації [202–206].

Запропоновані підходи мають наступні спільні етапи:

- 1) вибір ділянки експлуатації та моделі рухомого складу метрополітену з системами рекуперації;
- 2) визначення типових штатних умов експлуатації, які змінюються протягом доби (графік руху, завантаженість вагонів тощо);
- 3) експериментальне дослідження енергетичних процесів під час експлуатації рухомого складу з системами рекуперації в типових штатних умовах;
- 4) обробка отриманих масивів даних та визначення діапазону зміни потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування;
- 5) побудова гістограм за результатами обробки масивів даних з урахуванням запропонованих підходів;
- 6) безпосереднє визначення робочої енергоємності, номінальної та максимальної потужності СНЕ з урахуванням обраних критеріїв.

Далі за запропонованими підходами визначено необхідні параметри бортового СНЕ для конкретних штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації.

Перший етап. Як дослідну обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Рухомий склад представляє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні (див. рис. 2.1).

Другий етап. Прийнято наступні штатні умови експлуатації поїзда метрополітену з системами рекуперації протягом доби: три та два повних кола з дотриманням «непікового» графіку руху відповідно за номінального та максимального завантаження; одне та два повних кола з дотриманням «пікового» графіку руху відповідно за номінального та максимального завантаження; одне повне коло з дотриманням «непікового» графіку руху за мінімального завантаження.

Третій етап, який передбачає експериментальне дослідження енергетичних процесів під час експлуатації в типових умовах, виконано з використанням дослідного випробувального комплексу (див. рис. 2.1).

За результатами даних досліджень отримано осцилограми напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху поїзду під час його експлуатації в типових штатних умовах протягом доби. Осцилограми напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху поїзда під час його експлуатації з максимальним завантаженням між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії за умов дотримання «непікового» графіку руху, наведено на рис. 2.3–2.4.

Четвертий етап передбачає обробку масивів даних. За результатами обробки масивів даних, що отримані під час експлуатації рухомого складу в типових штатних умовах визначено такі показники для режимів рекуперативного гальмування: швидкість початку гальмування ($V_{гал}$), середня та максимальна потужність рекуперативного гальмування ($P_{сеп}$, P_{max}), а також кількість електроенергії рекуперації ($A_{тек}$).

Миттєва потужність рухомого складу для режиму рекуперативного гальмування визначається за виразом (3.1) [207]:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (3.1)$$

Середня потужність електроенергії рекуперативного гальмування визначається за виразом (3.2) [86]:

$$P_{\text{ср}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N P_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N U_k \cdot I_k, \quad (3.2)$$

де N – загальна кількість інтервалів дискретизації в процесі досліджень;

U_k, I_k – значення напруги і струму в момент часу t_k при дискретизації сигналів $u(t)$ та $i(t)$.

Кількість електроенергії рекуперації визначається за виразом (3.3) [86]:

$$A_{\text{рек}} = \frac{0}{3,6 \cdot 10^6} = \frac{\sum_{k=1}^T U_k \cdot I_k \cdot \Delta t}{3,6 \cdot 10^6}, \quad (3.3)$$

де T – час (період) досліджень;

Δt – інтервал квантування обробки сигналів $u(t)$ та $i(t)$, що дорівнює в даній роботі 0,5 с.

Результати обробки масивів даних для типових умов експлуатації поїзда, приведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати обробки масивів даних

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху мінімальне / номінальне / максимальне завантаження поїзда				«Піковий» графік руху номінальне / максимальне завантаження поїзда			
	V _{гал.} , км/год	P _{ср.} , кВт	P _{макс.} , кВт	A _{рек.} , кВт·год	V _{гал.} , км/год	P _{ср.} , кВт	P _{макс.} , кВт	A _{рек.} , кВт·год
Лісова–Чернігівська	49/53/49	989/1107/1325	1445/1798/2406	2,84/4,76/5,33	63/63	1722/1664	3879/2496	8,74/9,17
Чернігівська–Дарниця	45/42/43	578/545/1284	1119/1240/2120	3,5/2,7/4,1	54/55	892/1419	2425/2093	6,4/7,09
Дарниця–Лівобережна	47/58/40	674/806/961	1143/1422/1662	3,08/1,23/3,49	51/49	846/1019	2442/1969	6,19/6,64
Лівобережна–Гідропарк	52/62/52	866/1116/1475	1963/1665/2701	3,11/4,18/5,93	60/67	1267/1407	2455/2719	8,89/10,81
Гідропарк–Дніпро	47/50/50	649/799/1519	1216/1248/2102	2,02/2,43/6,75	53/50	1396/1191	2492/2219	8,29/8,39
Дніпро–Арсенальна	60/59/59	1429/1914/2220	2056/3028/3364	5,73/7,67/6,73	57/55	1782/1661	2367/2364	6,89/6,39
Арсенальна–Хрещатик	33/32/32	304/483/671	473/1248/1174	1,33/2,08/2,24	30/32	672/465	1085/945	1,83/2,13
Хрещатик–Театральна	43/47/48	588/857/1251	993/1563/2313	2,35/4,5/4,88	51/57	1022/1245	3050/2208	4,83/7,21
Театральна–Університет	40/43/43	538/936/1191	831/1333/1740	2,02/4,17/4,11	51/57	1054/1541	1874/2531	5,43/7,9
Університет–Вокзальна	41/39/43	539/624/1149	867/1182/2027	2,25/3,21/4,14	42/54	794/1410	1178/2733	3,64/6,85
Вокзальна–КПІ	44/49/45	414/556/1216	736/1147/1743	1,84/3,01/3,89	49/60	646/1519	1038/3060	3,15/6,75
КПІ–Шулявська	45/49/48	612/1041/1371	1022/1790/2312	3,33/4,76/4,74	44/56	649/1462	1127/2189	3,24/6,48
Шулявська–Берестейська	46/42/45	735/879/1322	947/1451/2058	2,76/3,41/4,6	47/58	821/1555	1261/2661	4,6/7,52
Берестейська–Нивки	56/48/47	782/866/1146	1184/1379/1675	3,48/4,08/4,29	46/51	829/1322	1182/1904	3,62/4,98
Нивки–Святошино	54/57/64	766/1298/1926	1763/2508/3073	3,19/7,16/9,04	59/70	1194/2009	2145/3713	7,36/11,91
Святошино–Житомирська	44/43/42	532/640/1176	828/1071/1784	2,44/3,64/3,76	42/56	673/1383	1071/2478	3,36/3,45
Житомирська–Академістечко	57/64/61	905/1312/1745	1695/2798/2849	6,16/9,75/8,69	61/70	864/1848	2177/3437	8,67/12,26
Академістечко–Житомирська	35/39/40	314/520/797	582/906/1097	1,57/2,44/3,1	69/44	1517/849	1772/1299	3,15/3,78
Житомирська–Святошино	29/-	237/-	320/-	1,19/-	56/59	1403/1397	3050/2668	6,74/7,36
Святошино–Нивки	40/41/40	574/838/926	931/1261/1729	2,87/3,94/3,47	40/43	620/1074	1242/1843	3,53/4,16
Нивки–Берестейська	54/58/53	1152/1712/1501	2029/3112/3041	4,31/8,04/6,46	65/59	1426/1786	2835/2565	10,18/7,93
Берестейська–Шулявська	57/45/50	1142/1087/1414	2096/1722/2936	5,22/5,44/6,48	52/57	1177/1560	2352/2901	7,16/9,08
Шулявська–КПІ	74/57/64	1114/1486/1627	2677/2761/3341	22,54/42,13/43,99	60/66	1543/1798	2136/3835	42,86/42,48
КПІ–Вокзальна	33/34/32	181/527/441	623/817/912	0,95/2,27/1,96	31/37	359/784	567/1529	1,75/2,13
Вокзальна–Університет	50/61/54	776/1184/1398	1539/2462/2934	3,46/8,2/6,59	49/67	986/1864	1720/3376	5,18/10,12
Університет–Театральна	37/70/44	470/524/729	696/1076/1111	1,76/0,87/2,13	70/69	839/811	1268/1285	0,58/1,92
Театральна–Хрещатик	-42/36	-584/716	-1294/1306	-4,52/2,87	40/42	551/580	977/880	4,43/4,42
Хрещатик–Арсенальна	36/39/38	385/526/631	636/782/914	1,9/2,4/2,53	38/45	489/968	720/1819	2,15/4,02
Арсенальна–Дніпро	40/42/38	351/679/610	602/986/811	2,57/3,21/2,7	40/45	458/925	764/1439	2,36/4,1
Дніпро–Гідропарк	31/27/33	415/326/532	739/545/653	1,06/0,95/2,14	44/49	770/1200	1436/1888	4,14/5,65
Гідропарк–Лівобережна	43/45/47	617/791/1097	934/1903/1815	2,99/3,38/4,41	49/46	513/1061	775/1567	3,34/4,12
Лівобережна–Дарниця	44/48/46	731/808/1052	1306/2208/2478	2,6/4,57/4,52	45/43	978/759	1400/1629	4,34/3,78
Дарниця–Чернігівська	60/58/59	1127/1031/1396	1845/2168/2763	6,27/11,83/9,87	65/65	1595/1436	2757/3106	11,43/13,69
Чернігівська–Лісова	40/41/46	582/590/995	876/1300/1990	2,55/2,78/4,66	41/53	549/1157	952/1961	3,2/5,94
Лісова–Лівобережна	53/56/54	707/838/1060	944/1387/2396	3,69/5,69/5,42	61/61	868/929	1817/1868	7,21/7,23
Лівобережна–Дарниця	55/54/51	783/716/1433	1513/1114/2217	4,6/2,08/6,15	51/49	1158/1388	2024/2590	5,91/5,37
Дарниця–Лісова	49/54/41	631/385/790	1089/1384/979	1,77/2,72/3,4	56/56	894/1322	1512/3017	6,3/6,18

Примітка. На деяких перегонах рекуперативне гальмування здійснюється два рази (в таблиці приведено два рядки з даними), що обумовлено наявністю «шкідливих» спусків на заданих ділянках.

На *п'ятому етапі* за даними табл. 3.4 побудовано імовірнісні характеристики у вигляді гістограм щільності розподілу середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації для трьох різних запропонованих підходів (рис. 3.5–3.7).

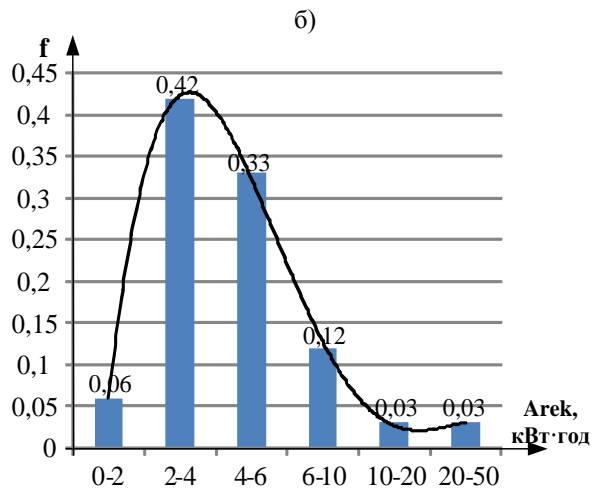
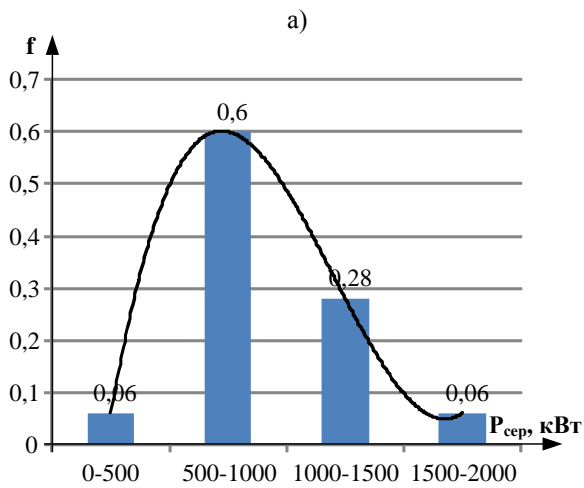


Рис. 3.5 – Гістограми щільності розподілу середньої потужності (а) та кількості електроенергії рекуперації (б) для першого підходу

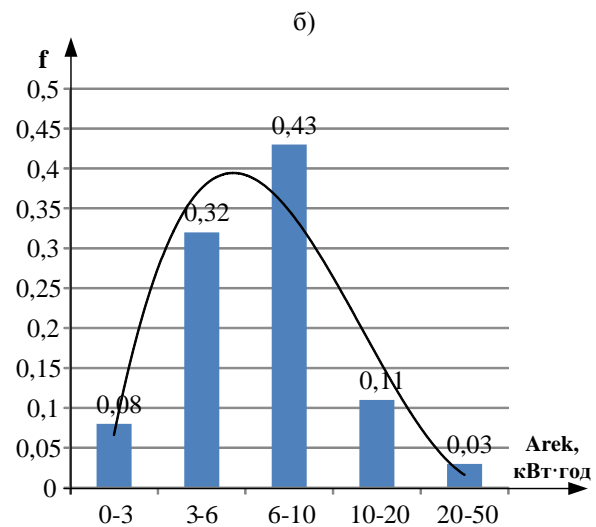
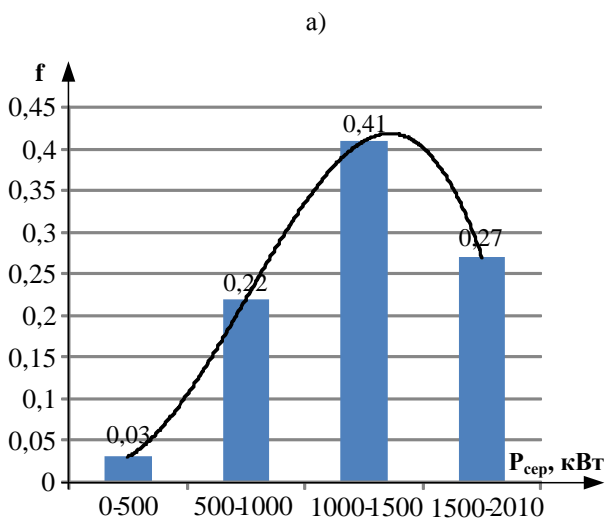


Рис. 3.6 – Гістограми щільності розподілу середньої потужності (а) та кількості електроенергії рекуперації (б) для другого підходу

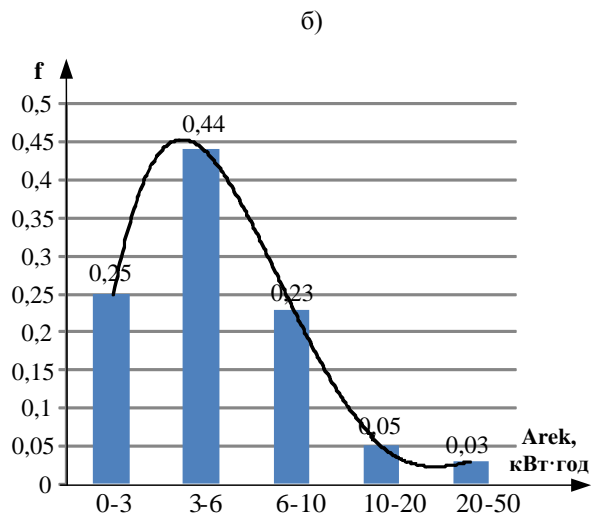
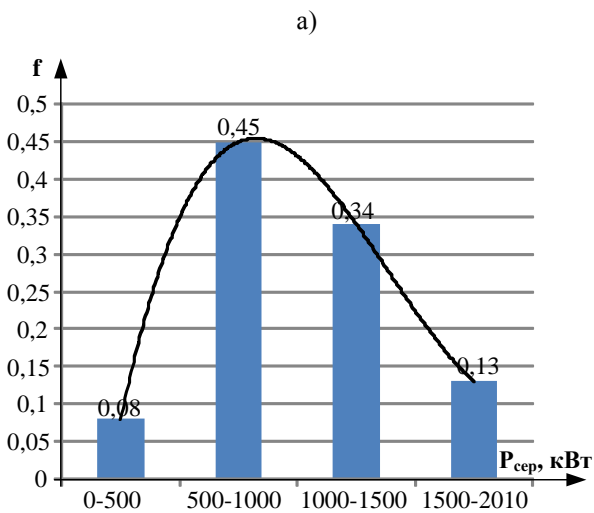


Рис. 3.7 – Гістограми щільності розподілу середньої потужності (а) та кількості електроенергії рекуперації (б) для третього підходу

Перший підхід передбачає побудову гістограм для найчастішої типової умови експлуатації протягом доби. За наявності декількох умов експлуатації з однаковою частотою події виникнення побудова гістограм здійснюються для умови з максимальною загальною кількістю електроенергії рекуперативного гальмування.

Другий підхід за максимальним режимом енергообміну, що в даному випадку відповідає «піковому» графіку руху поїзда з максимальним завантаженням.

Третій підхід передбачає побудову гістограм з урахуванням усіх типових штатних умов експлуатації поїзда протягом доби незалежно від їх кількості та частоти виникнення.

Побудова гістограм здійснювалась в наступній послідовності:

- визначення діапазону зміни величин середньої потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування для кожного з зазначених підходів;
- розбиття діапазону на декілька піддіапазонів;
- визначення щільності розподілу середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації за формулою (3.4) [206]:

$$f = \frac{n_i}{n_{\Sigma}}, \quad (3.4)$$

де n_i – кількість гальмувань для досліджуваного піддіапазону;

n_{Σ} – загальна кількість гальмувань;

– визначення закону розподілу величини середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації шляхом апроксимації даних щільності для прийнятих піддіапазонів.

За результатами аналізу даних табл. 3.4 та рис. 3.5–3.7 встановлено:

- середня потужність електроенергії рекуперації для першого підходу знаходиться в діапазоні 326...1924 кВт; для другого – 465...2009 кВт; для третього – 181...2220 кВт; кількість електроенергії для першого підходу – в діапазоні 0,87...44,4 кВт·год; для другого – 1,92...42,48 кВт·год; для третього – 0,58...43,99 кВт·год;

– необхідна енергоємність ЄНЕ для збереження повного об'єму електроенергії рекуперативного гальмування має складати для першого підходу не менше ніж 44,4 кВт·год; для другого – не менше ніж 44,61 кВт·год; для третього – не менше ніж 45,95 кВт·год;

– щільність розподілу середньої потужності та кількості електроенергії рекуперації описується нормальним законом.

За результатами аналізу значень миттєвої потужності для режимів рекуперативного гальмування максимально зафіксована величина потужності для першого підходу склала – 3112 кВт; для другого – 3835 кВт; для третього – 3879 кВт.

Шостий етап полягає у безпосередньому визначенні параметрів бортового накопичувача енергії за запропонованими критеріями. Критерії вибору параметрів бортового ЄНЕ запропоновано наступні:

– визначення номінальної потужності здійснюється за середньою потужністю електроенергії рекуперативного гальмування поїзда на заданій ділянці;

– максимальна потужність ЄНЕ обирається за максимальним (піковим) значенням миттєвої потужності електроенергії рекуперативного гальмування;

– визначення робочої енергоємності ЄНЕ здійснюється залежно від закону розподілу кількості електроенергії рекуперації: за рівномірного закону розподілу енергоємність визначається за максимальним значенням кількості електроенергії рекуперації (A_{\max}), при інших типових законах (трикутний, нормальний, експонентний тощо) – за середнім значенням ($A_{\text{ср}}$). При цьому визначається середньоквадратичне відхилення (σ) від розрахованого середнього значення.

Середні значення визначаються для довірчого інтервалу вибірки, що прийнято 0,95. Значення, що не потрапляють в довірчий інтервал, вважаються промахом і у визначенні середнього значення не враховуються.

Виходячи з вищевказаного, визначено довірчі інтервали для середнього значення потужності та кількості електроенергії рекуперації. При цьому були виключені наступні значення для першого підходу – 44,4 кВт·год; для другого – 465 кВт та 42,48 кВт·год; для третього – 22,54; 42,13; 42,48; 42,86; 43,99 кВт·год.

Результати досліджень щодо визначення середнього значення кількості електроенергії рекуперації ($A_{\text{ср}}$), середньоквадратичного відхилення (σ), номінальної потужності ЄНЕ ($P_{\text{ном.ЄНЕ}}$), максимальної потужності ЄНЕ ($P_{\text{максЄНЕ}}$), необхідної робочої енергоємності ЄНЕ ($A_{\text{ЄНЕ}}$), наведено в табл. 3.5. Також в табл. 3.5 наведено значення необхідної загальної енергоємності ЄНЕ з урахуванням прийнятого «мертвого об'єму» накопичувача на рівні 15 %.

Таблиця 3.5 – Результати досліджень

Параметр	Значення за I підходом	Значення за II підходом	Значення за III підходом
$A_{\text{ср}}$, кВт·год	4,58	6,58	4,84
σ , кВт·год	2,75	2,82	2,54
$P_{\text{ном.ЄНЕ}}$, кВт	870	1314	1017
$P_{\text{максЄНЕ}}$, кВт	3112	3835	3879
$A_{\text{ЄНЕ}}$, кВт·год	4,58	6,58	4,84
$A_{\text{заг}}$, кВт·год	5,27	7,57	5,57

Таким чином, величини номінальної та максимальної потужності, а також робочої та загальної енергоємності бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації поїзда з системами рекуперації за першим підходом мають складати відповідно 870 кВт; 3112 кВт; 4,58 кВт·год; 5,27 кВт·год, за другим – 1314 кВт; 3835 кВт; 6,58 кВт·год; 7,57 кВт·год, за третім – 1017 кВт; 3879 кВт; 4,84 кВт·год; 5,57 кВт·год.

Запропоновані підходи передбачають побудову гістограм з урахуванням усіх штатних типових умов експлуатації поїзда протягом доби. Перевагою підходів з використанням основних положень теорії імовірності є врахування реальних умов експлуатації поїзда (профілю колії, завантаженості тощо); недоліками – вибір параметрів виконується на основі критеріїв, які не дають змогу обґрунтувати визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ, а також не враховується техніко-економічна складова такого вибору.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці підходу, який би дозволив визначити раціональні параметри бортового ЄНЕ (номінальну та максимальну потужності, робочу та загальну енергоємності тощо).

3.3 Визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії за критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення

Загальним недоліком вищезгаданих методів і підходів є те, що жоден з них не дозволяє визначити раціональні параметри бортового ЄНЕ для рухомого складу метрополітену. В роботі [208] запропоновано здійснювати вибір параметрів бортових ЄНЕ на підставі аналізу залежності строку окупності від енергоємності. Тому далі в цій роботі запропоновано удосконалити цю ідею та створити повноцінний науковий підхід, який дозволить обґрунтувати вибір раціональних параметрів бортових ЄНЕ за критерієм мінімального строку окупності системи накопичення. Під системою накопичення мається на увазі бортовий ЄНЕ, реверсивний статичний перетворювач та система керування енергообмінними процесами.

Під час визначення раціональної енергоємності та потужності бортового ЄНЕ за критерієм мінімального строку окупності системи накопичення за заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації вирішувалися наступні задачі:

- розроблення підходу з визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ за критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення;
- визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену за розробленим підходом;
- дослідження кількості заощадженої електроенергії для заданих режимів ведення рухомого складу за рахунок впровадження системи накопичення з раціональними параметрами бортового ЄНЕ.

Для вирішення поставлених задач використовувались експериментально-розрахункові методи досліджень: експериментальне дослідження енергетичних процесів під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, методи математичної статистики для обробки даних експериментальних досліджень, методи техніко-економічного аналізу для оцінки вартості систем накопичення, аналітичні методи досліджень для визначення кількості заощадженої енергії за умов впровадження систем накопичення, методи порівняльного аналізу для визначення системи з раціональними параметрами бортового ЄНЕ.

Запропонований підхід визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації складається з наступних етапів:

- вибір ділянки експлуатації та моделі рухомого складу метрополітену з системами рекуперації;
- визначення типових штатних умов ведення рухомого складу на заданій ділянці колії;
- експериментальне дослідження енергетичних процесів під час типових штатних умов ведення рухомого складу метрополітену за графіком;
- обробка отриманих масивів даних та визначення діапазону зміни потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування;
- вибір бортових ЄНЕ з заданим рівнем потужності та енергоємності, які знаходяться в діапазоні зміни потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу;
- визначення вартості обраних систем накопичення з урахуванням експлуатаційних витрат на їх обслуговування;
- дослідження кількості заощадженої електроенергії від впровадження на рухомому складі обраних систем накопичення;
- побудова характеристики терміну окупності систем накопичення залежно від робочої потужності та енергоємності бортових ЄНЕ;
- визначення раціональної потужності та енергоємності ЄНЕ за результатами аналізу вищезазначеної характеристики.

Таким чином, суть даного підходу полягає у визначенні параметрів бортового ЄНЕ за аналізом характеристики терміну окупності систем накопичення. Далі із застосуванням цього підходу розглянемо визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ для конкретних заданих умов експлуатації рухомого складу.

Перший етап. Як дослідну обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Рухомий склад представляє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні (див. рис. 2.1).

Другий етап. Прийнято наступні типові штатні умови експлуатації поїзда метрополітену з системами рекуперації:

– у робочі дні (5 днів на тиждень) три та два повних кола з дотриманням «непікового» графіку руху відповідно за номінального та максимального завантаження; одне та два повних кола з дотриманням «пікового» графіку руху відповідно за номінального та максимального завантаження; одне повне коло з дотриманням «непікового» графіку руху за мінімального завантаження;

– у вихідні дні (2 дні на тиждень) два, сім та одне повних кола з дотриманням «непікового» графіку руху відповідно за мінімального, номінального та максимального завантаження.

Прийнято, що протягом року поїзд експлуатується 315 днів, з яких 225 робочих і 90 вихідних.

Третій етап, який передбачає експериментальне дослідження енергетичних процесів під час експлуатації у типових умовах, проведено з використанням дослідного випробувального комплексу (див. рис. 2.1).

За допомогою вимірювальної системи з частотою реєстрації процесів 2,5 кГц отримано осцилограми напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху складу під час його експлуатації за типових штатних умов протягом доби.

Четвертий етап передбачає обробку масивів даних. Обробка даних здійснюється на персональному комп'ютері за допомогою атестованого спеціалізованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО».

За результатами обробки масивів даних, що отримані під час експлуатації рухомого складу з системами рекуперації у типових штатних умовах, було визначено такі показники: середнє значення напруги контактної мережі в режимах тяги і рекуперативного гальмування ($U_{\text{сер.тяги}}$, $U_{\text{сер.рек}}$); середнє значення струму в режимах тяги поїзда ($I_{\text{сер.тяги}}$); середнє значення струму, що генерується поїздом до контактної мережі під час рекуперативного гальмування ($I_{\text{сер.рек}}$); середнє значення напруги на гальмівних резисторах ($U_{\text{сер.Р}}$); середнє значення струму, що розсіюється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах в режимі рекуперативного гальмування ($I_{\text{сер.Р}}$); час руху в режимах тяги та рекуперативного гальмування ($t_{\text{тяги}}$, $t_{\text{рек}}$), а також середня експлуатаційна швидкість на перегоні ($V_{\text{сер.екс}}$).

За визначеними величинами показників в процесі обробки масивів даних розраховано такі енергетичні показники: кількість спожитої електроенергії в режимах тяги ($A_{\text{тяги}}$); кількість електроенергії, що генерується поїздом під час рекуперативного гальмування ($A_{\text{рек}}$); максимальна потужність в режимах рекуперативного гальмування (P_{max}).

Кількість електроенергії, що споживається в режимах тяги, розраховується за формулою (2.1).

Кількість електроенергії, що генерується поїздом під час рекуперативного гальмування, розраховується за формулою (3.5) [167, 185]:

$$A_{\text{рек}} = A_{\text{рек}} + A_{\text{R}} = \frac{U_{\text{сер.рек}} \cdot I_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000} + \frac{U_{\text{сер.Р}} \cdot I_{\text{сер.Р}} \cdot t_{\text{рек}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (3.5)$$

Миттєва потужність поїзда для режимів рекуперативного гальмування визначається за виразом (3.1).

Максимальну потужність рекуперативного гальмування визначено із множини розрахованих значень за формулою (3.1), тобто за максимально зафіксованим значенням миттєвої потужності під час рекуперативного гальмування поїзда згідно з (3.6) [198]:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix} \rightarrow P_{\text{max}} \quad (3.6)$$

Результати розрахунків, виконаних за формулами (2.1), (3.1), (3.5), (3.6) для заданих штатних режимів ведення рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати обробки масивів даних

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху мінімальне / номінальне / максимальне завантаження поїзда			«Піковий» графік руху номінальне / максимальне завантаження поїзда		
	$A_{\text{тяги}}$, кВт·год	$A_{\text{рек}}$, кВт·год	P_{max} , кВт	$A_{\text{тяги}}$, кВт·год	$A_{\text{рек}}$, кВт·год	P_{max} , кВт
1	2	3	4	5	6	7
Лісова–Чернігівська	7,17/9,68/8,46	2,84/4,76/5,33	1445/1798/2406	12,28/14,6	8,5/10,06	3879/2496
Чернігівська–Дарниця	6,45/10,48/11,11	3,5/2,7/4,1	1119/1240/2120	15,34/15,92	6,27/7,67	2425/2093
Дарниця–Лівобережна	7,89/16,44/8,98	3,08/1,23/3,49	1143/1422/1662	13,65/13,63	6,07/6,65	2442/1969
Лівобережна–Гідропарк	7,35/15,24/9,8	3,11/4,18/5,93	1963/1665/2701	14,26/18,68	8,59/10,51	2455/2719
Гідропарк–Дніпро	13,61/22,82/21,81	2,02/2,43/6,75	1216/1248/2102	23,71/23,52	8,29/8,07	2492/2219
Дніпро–Арсенальна	3,64/4,63/3,48	5,88/9,68/8,97	2056/3028/3364	3,38/2,28	8,45/8,22	2367/2364
Арсенальна–Хрещатик	8,76/12,03/12,77	2,35/4,49/4,89	993/1563/2313	13,92/13,94	4,59/6,87	3050/2208
Хрещатик–Театральна	4,87/8,18/8,25	2,02/4,17/4,11	831/1333/1740	11,06/14,18	5,29/7,69	1874/2531
Театральна–Університет	5,91/8,14/9,2	2,25/3,21/4,14	867/1182/2027	11,3/13,55	3,64/5,42	1178/2733
Університет–Вокзальна	6,22/8,47/9,85	1,84/3,02/3,89	736/1147/1743	9,3/14,45	3,15/6,54	1038/3060

Кінець таблиці 3.6

1	2	3	4	5	6	7
Вокзальна–КПІ	10,84/16,19/16,75	3,33/4,76/4,74	1022/1790/2312	14,4/20,53	2,98/6,48	1127/2189
КПІ–Шулявська	8,68/11,67/13,05	2,66/3,41/4,75	947/1451/2058	15,78/18,37	4,44/7,31	1261/2661
Шулявська–Берестейська	52,39/78,21/81,31	3,48/4,08/4,29	1184/1379/1675	79,27/84,09	3,51/5,52	1182/1904
Берестейська–Нивки	8,81/11,96/17,68	3,19/7,16/9,04	1763/2508/3073	15,78/21,82	7,36/11,64	2145/3713
Нивки–Святошин	9,07/13,61/13,69	2,44/3,64/3,76	828/1071/1784	13,15/9,66	3,36/3,26	1071/2478
Святошин–Житомирська	5,34/7,83/6,25	6,16/9,75/8,69	1695/2798/2849	6,04/11,95	8,55/12,26	2177/3437
Житомирська–Академістечко	1,65/2,63/2,88	1,82/2,44/3,1	582/906/1097	4,98/4,15	4,34/3,67	1772/1299
Академістечко–Житомирська	15,17/22,04/19,03	3,61/5,54/3,78	1144/2023/1677	24,22/25,22	6,75/7,35	3050/2668
Житомирська–Святошин	14,45/24,63/24,56	2,87/3,94/3,47	931/1261/1729	24,14/25,92	7,05/4,02	1242/1843
Святошин–Нивки	6,31/10,48/8,47	4,31/8,04/6,46	2029/3112/3041	14,15/12,05	10,18/7,68	2835/2565
Нивки–Берестейська	11,07/11,43/13,39	5,22/5,44/6,35	2096/1722/2936	15,5/17,85	7,01/8,67	2352/2901
Берестейська–Шулявська	4,94/5,14/5,11	25,3/44,26/45,93	2677/2761/3341	4,69/5,72	44,35/45,36	2136/3835
Шулявська–КПІ	7,53/14,01/11,78	2,28/8,2/6,6	1539/2462/2934	9,28/17,83	5,19/9,86	1720/3376
КПІ–Вокзальна	11,07/14,76/15,21	1,76/5,39/5,0	696/1294/1306	14,85/16,2	5,01/6,35	1268/1285
Вокзальна–Університет	6,86/8,04/8,15	1,9/2,33/2,53	636/782/914	8,08/10,44	2,15/3,89	720/1819
Університет–Театральна	5,81/8,67/7,94	2,57/3,21/2,7	602/986/811	8,18/10,39	2,35/3,97	764/1439
Театральна–Хрещатик	6,01/6,7/8,14	1,06/0,95/2,13	739/545/653	11,44/12,93	4,14/5,49	1436/1888
Хрещатик–Арсенальна	11,05/12,76/13,83	2,99/3,38/5,0	934/1903/1815	12,58/13,88	3,34/4,83	775/1567
Арсенальна–Дніпро	15,76/22,94/23,13	2,6/4,57/4,5	1306/2208/2478	22,42/22,32	4,35/3,78	1400/1629
Дніпро–Гідропарк	9,87/13,61/10,49	6,27/11,93/9,86	1845/2168/2763	13,1/15,91	11,21/13,69	2757/3106
Гідропарк–Лівобережна	8,71/12,6/15,07	2,55/2,78/4,66	876/1300/1990	13,1/17,75	3,12/5,64	952/1961
Лівобережна–Дарниця	7,32/10,44/9,96	3,69/5,69/5,42	944/1387/2396	12,45/12,83	7,21/7,1	1817/1868
Дарниця–Чернігівська	9,91/12,68/11,52	4,6/2,08/6,13	1513/1114/2217	11,34/11,0	5,91/5,19	2024/2590
Чернігівська–Лісова	8,36/14,99/11,83	1,77/2,72/3,4	1089/1384/979	16,28/15,4	6,3/6,0	1512/3017

На *n'ятому етапі* за аналізом результатів обробки отриманих під час експериментальних досліджень масивів даних обрано бортові ЄНЕ з заданим рівнем потужності та енергоємності.

За результатами обробки даних кожного рекуперативного гальмування (табл. 3.6) зрозуміло, що значення максимальної потужності електроенергії змінюється в межах від 473 кВт до 3879 кВт, кількість електроенергії – в межах від 0,58 кВт·год до 45,93 кВт·год. Виходячи із отриманих меж зміни даних, обрано бортові ЄНЕ з рівнем потужності і робочої енергоємності, які наведено в табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Обрані параметри бортових ЄНЕ

Потужність, кВт	Робоча енергоємність, кВт·год
1000; 2000; 3000; 4000	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 20; 30; 45

Таким чином, загальна кількість варіантів обраних бортових ЄНЕ з різним рівнем потужності і енергоємності в даному випадку складає 52.

На *шостому етапі* оцінці підлягала вартість систем накопичення за результатами аналізу вартості обраних бортових ЄНЕ, реверсивних перетворювачів та іншого комплектувального обладнання від фірм-виробників даної продукції.

Вартість обраних систем накопичення наведено у табл. 3.8. Даний аналіз дозволив встановити, що вартість системи накопичення в основному залежить від вартості БНЕ та реверсивного перетворювача, інше комплектувальне обладнання має значно меншу ціну.

Таблиця 3.8 – Вартість обраних систем накопичення

Потужність, кВт	Вартість з урахуванням різної робочої енергоємності бортових ЄНЕ [кВт·год], млн. грн.												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	45
1000	1,0	1,8	2,5	3,1	3,7	4,3	4,9	5,5	6,0	6,5	15	30	70
2000	1,5	2,3	3,0	3,6	4,2	4,9	5,5	6,1	6,7	7,2	20	37,5	80
3000	2,0	2,8	3,5	4,1	4,7	5,5	6,1	6,7	7,4	7,9	25	45	90
4000	2,5	3,3	4,0	4,6	5,2	6,1	6,7	7,3	8,1	8,6	30	52,5	100

Примітка. Оцінку вартості бортових систем наведено за умов використання конденсаторних модулів виробництва ЗАТ «Елтон». Значення «мертвого» об'єму конденсаторних модулів прийнято 20 %.

За результатами аналізу цін від фірм-виробників продукції (табл. 3.8) побудовано графіки у вигляді залежностей вартості систем накопичення від потужності та енергоємності бортового ЄНЕ (рис. 3.8). Аналіз графіків (рис. 3.8) дозволив встановити, що у разі збільшення потужності системи накопичення її вартість лінійно зростає, у разі збільшення енергоємності – вартість зростає за експоненціальним законом. При цьому на початковому етапі підвищення енергоємності системи накопичення вартість має незначне зростання, однак після певної величини енергоємності спостерігається явно виражене різке зростання вартості. Цей факт пояснюється тим, що на даний час технологія виготовлення бортових ЄНЕ обраної номенклатури енергоємності знаходиться на різних стадіях. Системи накопичення енергоємністю до 10 кВт·год виготовляється серійно, в той час як після 10 кВт·год системи накопичення існують лише як дослідні зразки.

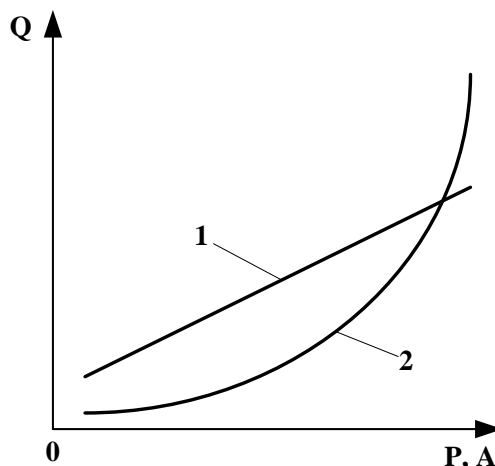


Рис. 3.8 – Графіки зміни вартості систем накопичення залежно від величини потужності та енергоємності: 1 – залежність $Q=f(P)$ за умови $A=const$; 2 – залежність $Q=f(A)$ за умови $P=const$

Сьомий етап полягає в оцінці кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення. Для кожного типу обраної системи виконано дослідження у відповідній послідовності. Спочатку для кожної штатної типової умови експлуатації та обраної системи накопичення виконують перевірку щодо обмеження потужності, за результатами якої, за необхідності, проводять перерахунок кількості рекуперованої електроенергії, направленої в накопичувач. Далі виконують оцінку кількості заощадженої електроенергії з урахуванням обмежень за енергоємністю за допомогою спеціалізованої атестованої підпрограми «Рекуперація енергії». Алгоритм роботи вищезазначеної підпрограми детально описано в роботах [186, 209, 210]. Спрощений алгоритм виконання цих досліджень показано на рис. 3.9.

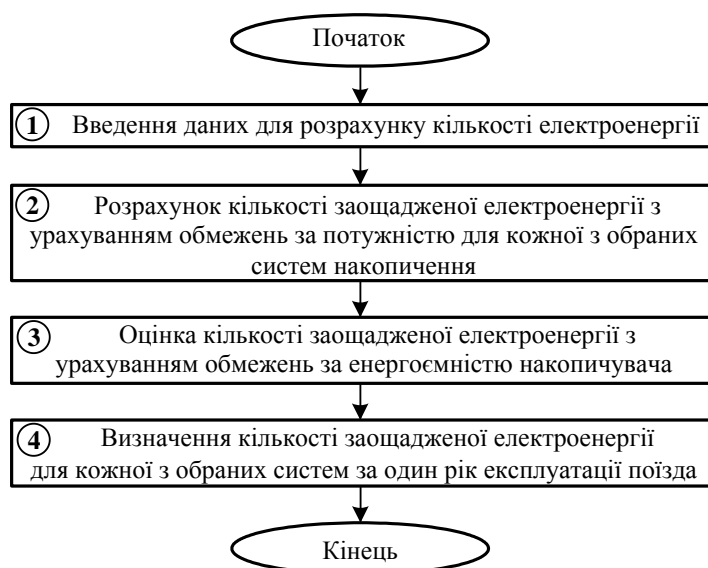


Рис. 3.9 – Алгоритм досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії

Під час досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії прийнято наступні припущення: перед проведенням розрахунків бортовий ЄНЕ повністю розряджений, коефіцієнт корисної дії (ККД) бортового ЄНЕ складає 0,98 ($\eta_{\text{ЄНЕ}} = 0,98$), ККД реверсивного перетворювача – 0,96 ($\eta_{\text{РП}} = 0,96$), ККД тягового двигуна – 0,94 ($\eta_{\text{ТД}} = 0,94$), ККД редуктора – 0,98 ($\eta_{\text{ред}} = 0,98$).

Під час виконання досліджень визначають такі показники: кількість заощадженої електроенергії за цикл збереження електроенергії (рекуперативне гальмування та її акумулювання) під час розгону поїзда, кількість заощадженої електроенергії для кожної штатної типової умови експлуатації, кількість заощадженої електроенергії за один день та рік.

Кількість заощадженої електроенергії за цикл рекуперативне гальмування-розгін поїзда визначається за формулою (3.7) [186, 206]:

$$E = A_{\text{рек}} \cdot \eta_{\text{тяги}}, \quad (3.7)$$

де $\eta_{\text{тяги}} = \eta_{\text{СНЕ}} \cdot \eta_{\text{РП}}^2 \cdot \eta_{\text{ТД}} \cdot \eta_{\text{РЕД}} - \text{ККД}$ енергообмінних процесів за цикл збереження та акумулювання електроенергії рекуперації.

Кількість заощадженої електроенергії для кожної штатної типової умови експлуатації визначається за формулою (3.8) [186]:

$$E_k = E_1 + E_2 + \dots + E_K, \quad (3.8)$$

де K – кількість циклів для типової умови експлуатації поїзда.

Кількість заощадженої електроенергії за один день визначається за формулою (3.9) [186]:

$$E_d = b_1 \cdot E_{k1} + b_2 \cdot E_{k2} + \dots + b_c \cdot E_{kc}, \quad (3.9)$$

де b – кількість кіл за день для штатної типової умови експлуатації поїзда;

c – кількість штатних типових умов експлуатації поїзда.

Кількість заощадженої електроенергії за рік визначається за формулою (3.10) [186]:

$$E_r = I_1 \cdot E_{d1} + I_2 \cdot E_{d2}, \quad (3.10)$$

де I_1, I_2 – кількість робочих і вихідних днів на рік;

E_{d1}, E_{d2} – кількість заощадженої електроенергії у робочий та вихідний дні відповідно.

З використанням вищезазначеного алгоритму (рис. 3.9) та формул (3.7–3.10) визначено величину заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення. Результати з оцінки кількості заощадженої електроенергії за рік для кожної з обраних систем накопичення, наведено в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 – Кількість заощадженої електроенергії за рік

Потужність, кВт	Кількість заощадженої електроенергії з урахуванням різної робочої енергоємності бортових СНЕ [кВт·год], млн. кВт·год												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30	45
1000	0,08	0,16	0,23	0,27	0,29	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,34	0,35	0,35
2000	0,08	0,16	0,23	0,28	0,32	0,35	0,36	0,38	0,38	0,39	0,42	0,44	0,47
3000	0,08	0,16	0,23	0,28	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,4	0,43	0,46	0,49
4000	0,08	0,16	0,24	0,28	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,4	0,43	0,46	0,49

Восьмий етап передбачає побудову характеристики (діаграм) терміну окупності систем накопичення залежно від робочої потужності та енергоємності бортових СНЕ.

В даному випадку було обрано 52 системи накопичення з різним рівнем потужності і енергоємності. Цього достатньо, щоб для заданих умов експлуатації визначити систему з раціональними параметрами. Для більш точного визначення раціональних параметрів потрібно в розрахунках обирати більшу кількість бортових СНЕ з різним рівнем енергоємності і потужності (наприклад, замість матриці 13x4 обрати 20x8).

Величина терміну окупності визначається за відношенням вартості від впровадження системи накопичення до вартості заощадженої електроенергії ціною системою за рік (3.11) [186]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{Q}{T_e \cdot E_r}, \quad (3.11)$$

де Q – вартість системи накопичення;

T_e – тариф на електроенергію ($T_e = 1,97$ грн./кВт·год).

Результати розрахунку терміну окупності для обраних систем накопичення зображено у вигляді діаграм на рис. 3.10.

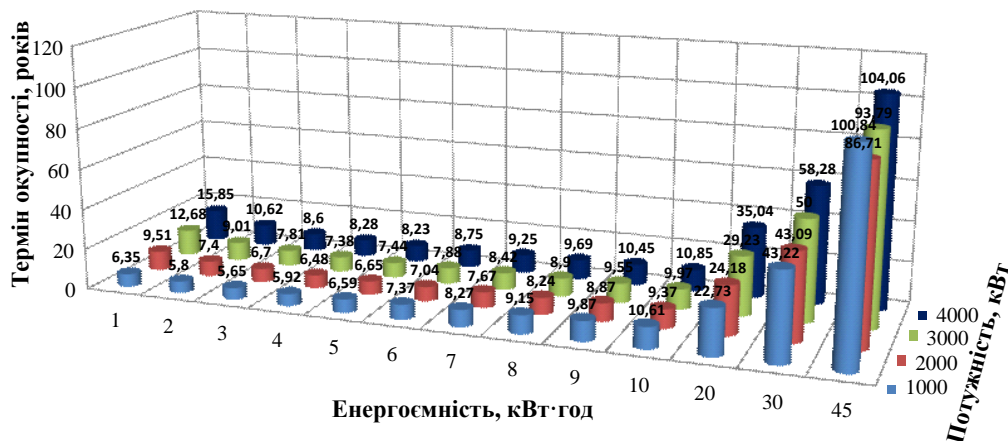


Рис. 3.10 – Діаграми терміну окупності обраних систем накопичення

Дев'ятий етап. За результатами аналізу діаграм терміну окупності обраних систем накопичення визначається система з раціональними параметрами.

За результатами аналізу діаграм (рис. 3.10) встановлено наступне:

– з обраних систем накопичення за заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену найбільш раціональною є система з величиною робочої енергоємності 3 кВт·год та максимальною потужністю 1000 кВт, оскільки термін окупності цієї системи мінімальний і складає близько 5,7 років;

– максимальний термін окупності має система з величиною робочої енергоємності бортового ЄНЕ 45 кВт·год та максимальною потужністю 4000 кВт, яка здатна зберігати та акумулювати повний об'єм електроенергії рекуперативного гальмування. Термін окупності системи складає близько 104 років. Слід зазначити, що у порівнянні з іншими ця система має і найбільші масогабаритні показники. Як наслідок, цю систему недоцільно впроваджувати за двома чинниками: терміном окупності та масогабаритними показниками;

– динаміка зміни терміну окупності систем накопичення з робочою енергоємністю бортового ЄНЕ до 10 кВт·год незначна, в той час як після 10 кВт·год спостерігається явно виражений характер зростання.

Для впровадження системи накопичення з раціональними параметрами розраховано кількість заощадженої електроенергії за формулою (3.12) [186]:

$$\alpha = \frac{E_{\Gamma}}{A_{\text{тяги(рік)}}} \cdot 100, \quad (3.12)$$

де $A_{\text{тяги(рік)}}$ – кількість спожитої електроенергії за рік, кВт·год.

З використанням формули (3.12) визначено, що для заданих умов експлуатації впровадження системи накопичення з раціональними параметрами дозволить заощадити 16,1 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу.

На основі розробленого підходу виконано дослідження, за результатами яких визначено раціональні параметри бортового ЄНЕ (максимальну потужність та робочу енергоємність) для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації та виконано кількісну оцінку заощадженої електроенергії від впровадження цієї системи. Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці наукового підходу, який би дозволив визначити раціональні параметри бортового ЄНЕ не тільки за критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення, а й з урахуванням інших важливих критеріїв.

3.4 Визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії з урахуванням маси та вартості системи накопичення

В подальшому запропоновано обґрунтувати вибір раціональних параметрів бортового ЄНЕ з використанням двокритеріального підходу, який одночасно буде враховувати масові та вартісні показники системи накопичення.

Для обґрунтування вибору раціональних параметрів бортового ЄНЕ за заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації шляхом використання цього наукового підходу вирішувалися наступні задачі:

– розроблення двокритеріального підходу щодо визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ, який дозволить враховувати масові та вартісні показники системи накопичення;

– визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з використанням двокритеріального підходу;

– визначення кількості заощадженої електроенергії для заданих режимів ведення рухомого складу за рахунок впровадження системи накопичення з раціональними параметрами.

Для вирішення поставлених задач використовувались експериментально-розрахункові методи досліджень: теоретичні основи електричної тяги під час виконання тягових розрахунків, експериментальне дослідження енергетичних процесів під час експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації за типових штатних умов, методи математичної статистики для обробки даних експериментальних досліджень, методи техніко-економічного аналізу для оцінки вартості систем накопичення, аналітичні методи досліджень для визначення кількості заощадженої енергії за умов впровадження систем накопичення, методи порівняльного аналізу для визначення системи накопичення з раціональними параметрами за залежністю терміну окупності від величини енергоємності та потужності.

Запропонований двокритеріальний підхід складається з таких етапів:

– вибір ділянки експлуатації та моделі поїзда метрополітену з системами рекуперації;

– виконання тягових розрахунків з метою визначення можливості збільшення тягового зусилля рухомого складу метрополітену за умов забезпечення нормованих значень прискорень та сповільнень (визначення масових обмежень для системи накопичення за результатами аналізу виконаних тягових розрахунків);

– визначення області можливих значень потужності та енергоємності з урахуванням обмежень за масою за результатами аналізу побудованих залежностей маси від потужності $m=f(P)$ та маси від енергоємності $m=f(A)$;

- визначення типових штатних умов ведення рухомого складу на заданій ділянці колії;
- експериментальне дослідження енергетичних процесів під час типових умов ведення рухомого складу метрополітену за графіком;
- обробка отриманих масивів даних та визначення діапазону зміни потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування;
- вибір бортових ЄНЕ з заданим рівнем потужності та енергоємності, які знаходяться в діапазоні зміни потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу з урахуванням обмежень за масою;
- визначення вартості обраних систем накопичення з урахуванням експлуатаційних витрат на їх обслуговування;
- дослідження кількості заощадженої електроенергії від впровадження на рухомому складі обраних систем накопичення;
- побудова характеристик терміну окупності систем накопичення залежно від робочої потужності та енергоємності бортових ЄНЕ;
- визначення раціональної потужності та енергоємності ЄНЕ за результатами аналізу вищезазначених характеристик.

Таким чином, суть даного двокритеріального підходу полягає у визначенні раціональних параметрів бортового ЄНЕ за двома показниками системи накопичення – масою та вартістю. Даний підхід складається з 11 етапів, основною відмінністю якого від попереднього є виконання тягових розрахунків з метою визначення обмежень за масою для системи накопичення (етапи 2 та 3). Далі із застосуванням цього підходу розглянемо визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ для аналогічних заданих умов експлуатації рухомого складу.

Перший етап. Як дослідну обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Рухомий склад представляє собою п’ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні (див. рис. 2.1). В якості дослідної ділянки та дослідного рухомого складу обрано аналогічні об’єкти, що і для попередніх підходів.

Другий етап (виконання тягових розрахунків). В основу тягових розрахунків покладено принципи вибору сили тяги (гальмування) з урахуванням обмежень за максимальним моментом двигуна, за зчепленням коліс з рейками та забезпечення тяговими двигунами заданої динаміки руху поїзда. Алгоритм тягових розрахунків для визначення обмежень за масою наведено на рис. 3.11.

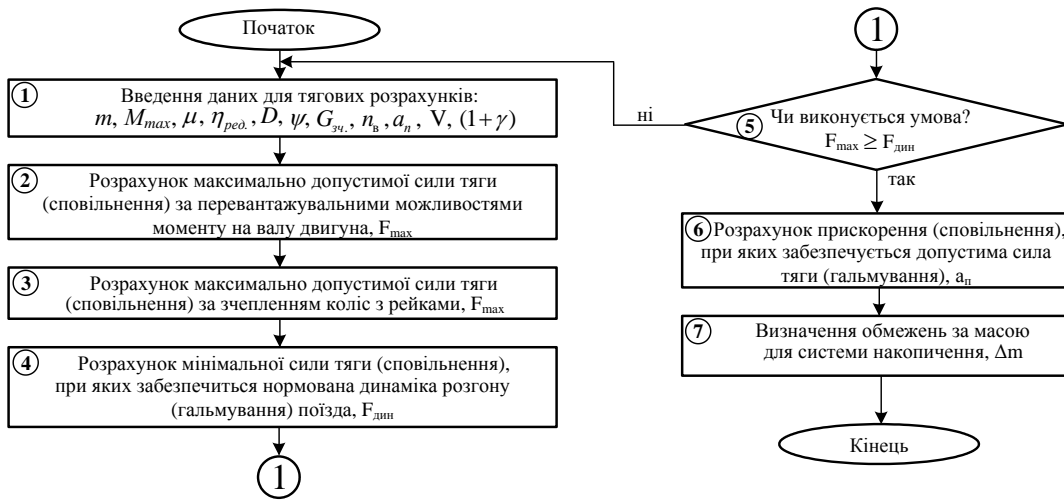


Рис. 3.11 – Алгоритм тягових розрахунків

Розрахунок максимально допустимої сили тяги (гальмування) за перевантажувальними можливостями моменту на валу двигуна виконують за умови (3.13) [185, 211]:

$$F_{\max} \leq \frac{2 \cdot M_{\max} \cdot \mu \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot N_{\text{дв}}}{D}, \quad (3.13)$$

де M_{\max} – максимальний момент на валу тягового двигуна, Н·м;

μ – передаточне число редуктора;

$\eta_{\text{ред}}$ – коефіцієнт корисної дії редуктора;

D – діаметр колеса, м;

$N_{\text{дв}}$ – кількість тягових двигунів, шт.

Розрахунок максимально допустимої сили тяги (гальмування) за зчепленням коліс з рейками виконують за умови (3.14) [185, 211]:

$$F_{\max} \leq 1000 \cdot G_{зч} \cdot \psi, \quad (3.14)$$

де $G_{зч}$ – сила тяжіння (зчіпна вага), яка припадає на обмоторені осі рухомого складу, кН;
 ψ – розрахункове значення коефіцієнта зчеплення за нормальних умов.

Примітка. Розрахункове значення коефіцієнта зчеплення колеса з рейкою для рухомого складу метрополітену з асинхронним тяговим приводом за нормальних умов згідно [211, 212] дорівнює 0,22

Розрахунок необхідної сили тяги (гальмування), виходячи з вимог нормативної документації щодо значень середнього прискорення (сповільнення), виконують за умови (3.15) [211, 212]:

$$F_{\text{дин}} \geq m \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W_{\text{осн}}, \quad (3.15)$$

де m – маса рухомого складу, кН;
 $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертючих мас рухомого складу;
 a – нормоване значення прискорення, м/с^2 ;
 $W_{\text{осн}}$ – основний опір руху складу, кН.

Розрахунок основного опору руху складу виконують за формулою (3.16) [212]:

$$W = \left(1,1 + \frac{(0,09 + 0,022 \cdot n_{\text{в}}) \cdot V^2}{m} \right) \cdot G_{зч}, \quad (3.16)$$

де $n_{\text{в}}$ – кількість вагонів рухомого складу, шт;
 V – значення швидкості руху поїзда, км/год.

Розрахунок максимально допустимої сили тяги (гальмування) виконують з урахуванням умов (3.13)–(3.15). У випадку, якщо максимально допустима сили тяги (гальмування) не відповідає жодному з наведених умов, тоді впровадження ЄНЕ на рухомому складі не представляється можливим (необхідно збільшити число моторних осей рухомого складу метрополітену, обрати тягові двигуни з іншими параметрами тощо). У іншому випадку виконують розрахунок значення прискорення (сповільнення), за якого забезпечується допустима сила тяги за формулою (3.17) [211]:

$$a_{\text{п}} = \frac{F_{\max} - W}{m(1 + \gamma)} \quad (3.17)$$

При цьому в розрахунках вживають менше значення допустимої сили тяги ($F_{\max} \rightarrow \min$), виходячи із зазначених умов (3.13) та (3.14).

Визначення обмежень за масою виконують за формулою (3.18):

$$\Delta m \leq \frac{F_{\max} - F_{\text{дин}}}{a \cdot (1 + \gamma)} \quad (3.18)$$

Чинним нормативним документом [213] встановлено вимоги до динаміки розгону (сповільнення) рухомого складу метрополітену. Згідно з вимогами цього документу під час розгону поїзда до швидкості 33 км/год має бути забезпечено середнє прискорення не менше ніж $1,2 \text{ м/с}^2$, а також під час гальмування поїзда з початкової швидкості 90 км/год – середнє сповільнення має бути не менше ніж $1,15 \text{ м/с}^2$ за умов номінального завантаження рухомого складу. Враховуючи, що на дослідному рухомому складі метрополітену наявне комбіноване гальмування (суміщення електричного та пневматичного), на перший план виходить забезпечення нормованого прискорення. Таким чином, тягові розрахунки виконано для перевірки умови забезпечення розгону рухомого складу.

Параметри тягових асинхронних двигунів (ГД), що встановлені на модернізованому поїзді метрополітену такі: $P_{\text{н}} = 150 \text{ кВт}$; $U_{\text{н}} = 610 \text{ В}$; $I_{\text{н}} = 185 \text{ А}$; $n_{\text{н}} = 1900 \text{ об/хв}$; $f_{\text{н}} = 65 \text{ Гц}$; $M_{\max} = 2,21 \text{ кН} \cdot \text{м}$. Параметри тягової передачі та поїзда метрополітену: $D = 0,825 \text{ м}$; $\eta_{\text{ред}} = 0,975$; $\mu = 6,95$; $m = 238,7 \text{ т}$ (номінальне завантаження); $G_{зч} = 1,44 \text{ кН}$; $(1 + \gamma) = 1,06$; $a = 1,2 \text{ м/с}^2$.

Результати тягових розрахунків, виконаних за формулами (3.13)–(3.18), представлено в табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Результати тягових розрахунків

Параметр	Значення
F_{\max} за формулою (3.13), кН	≤ 436
F_{\max} за формулою (3.14), кН	≤ 317
$F_{\text{дин}}$, кН	≥ 307
$W_{\text{осн}}$, кН	2,9
$a_{\text{п}}$, м/с^2	1,24
Δm , т	7,86

Третій етап. Будуються залежності маси від потужності $m=f(P)$ та маси від енергоємності $m=f(A)$ з урахуванням визначення обмежень для системи накопичення за масою. Виконується побудова сімейства характеристик та визначаються максимально можливі значення потужності і енергоємності залежно від ти-

пів обраних конденсаторних модулів, з яких складається бортовий ЄНЕ. З урахуванням обмежень за масою визначається область можливих значень потужності та енергоємності бортового ЄНЕ.

Область можливих значень потужності та енергоємності визначено за умов застосування систем накопичення, зібраних на базі конденсаторних модулів виробництва ЗАТ «ЕЛТОН». Технічні характеристики конденсаторних модулів типу ЕК303, ЕК404, ЕК406, ЕК503, представлено в табл. 3.11.

Таблиця 3.11 – Технічні характеристики конденсаторних модулів

Назва показника	Тип конденсаторного модуля			
	ЕК303	ЕК404	ЕК406	ЕК503
Робоча напруга, В	1,5-0,75	1,5-0,75	1,5-0,75	1,5-0,75
Ємність, Ф	45000	12000	8800	7200
Загальна (максимальна) кількість енергії, яку здатний запасати накопичувач, кДж	50,6	12,6	9,3	7,6
Кількість енергії, що запасується в діапазоні робочої напруги, кДж	38,0	10,1	7,4	6,1
Внутрішній опір, мОм	2,0	0,4	0,4	0,4
Маса, кг	3,4	0,9	1,0	1,0
Габаритні розміри, мм	51x18x250	84x32x210	84x32x210	84x32x148
Максимальна потужність, кВт	2,8	1,4	1,4	1,4
Робоча температура, °С	-50...+70	-50...+60	-50...+65	-50...+70

За результатами визначення обмежень за масою побудовано залежності маси від потужності $m=f(P)$ та маси від енергоємності $m=f(A)$, які зображено на рис. 3.12.

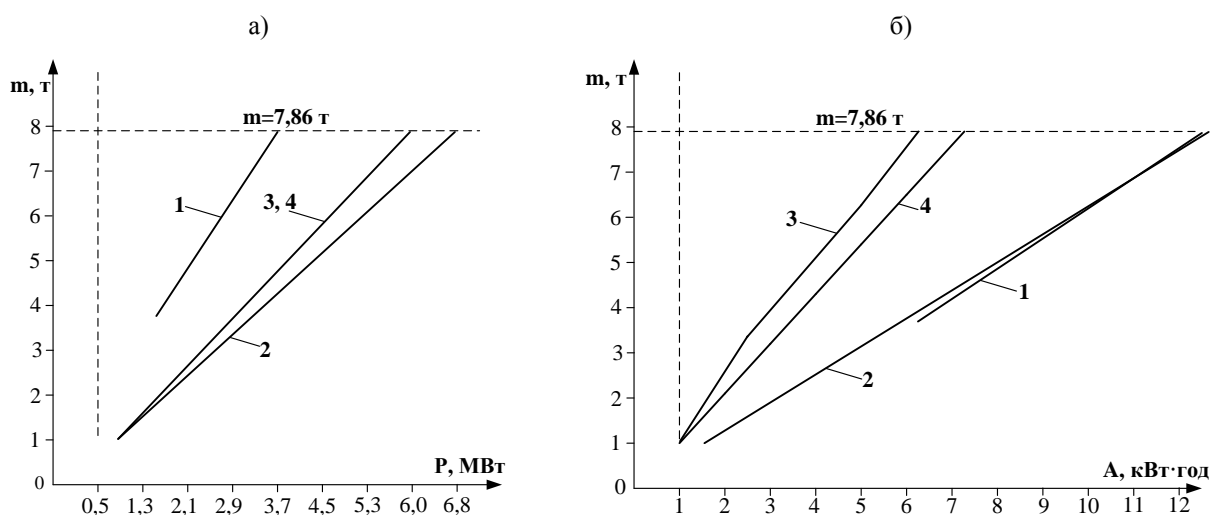


Рис. 3.12 – Залежність маси від потужності (а) та маси від енергоємності (б) систем накопичення, зібраних з конденсаторних модулів типу: 1 – ЕК303; 2 – ЕК404; 3 – ЕК406; 4 – ЕК503

При цьому системи накопичення необхідного значення робочої напруги, потужності та енергоємності формувались шляхом послідовно-паралельного з'єднання зазначених конденсаторних модулів. Масу системи накопичення визначено з урахуванням маси конденсаторних модулів (накопичувача), керованого перетворювача, металоконструкції, з'єднувальних проводів (шин), датчиків струму та напруги, елементів системи охолодження і системи керування та інших додаткових матеріалів.

За результатом аналізу графіків (рис. 3.12) визначено області можливих значень потужності та енергоємності з урахуванням обмежень за масою. Зокрема для системи накопичення з робочою напругою (450-900) В, зібраної з конденсаторних модулів типу ЕК303, максимально допустиме значення потужності і енергоємності не має перевищувати відповідно 3,36 МВт і 12,67 кВт·год; з модулів типу ЕК404 – 6,8 МВт і 12,9 кВт·год; з модулів типу ЕК406 – 6,0 МВт і 6,2 кВт·год; з модулів типу ЕК503 – 6,0 МВт і 7,1 кВт·год.

Зміст етапів чотири, п'ять, шість та результати досліджень за однакових заданих умов експлуатації рухомого складу за цими етапами є ідентичними та повністю відповідають результатам досліджень за етапами два, три, чотири попереднього підходу, тому необхідність зупинятись на них – відсутня (див. стор. 43, 44).

На сьомому етапі обираються бортові ЄНЕ з заданим рівнем потужності та енергоємності за аналізом результатів обробки отриманих масивів даних під час експериментальних досліджень та з урахуванням обмежень за масою. Виходячи із отриманих меж зміни даних та з урахуванням обмежень за масою, для пода-

льших розрахунків залежно від типу конденсаторних модулів обрано бортові СНЕ з рівнем потужності і робочої енергоємності, які наведено в табл. 3.12.

Таблиця 3.12 – Обрані параметри бортових СНЕ

Тип конденсаторного модуля	Потужність, МВт	Робоча енергоємність, кВт·год
ЕК303	2; 3	7; 8; 9; 10; 11; 12
ЕК404	1; 2; 3; 4	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12
ЕК406	1; 2; 3; 4	1; 2; 3; 4; 5; 6
ЕК503	1; 2; 3; 4	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7

Таким чином, загальна кількість обраних бортових СНЕ з різним рівнем потужності і енергоємності в даному випадку для систем накопичення з конденсаторних модулів типу ЕК303 складає 12; типу ЕК404 – 48; типу ЕК406 – 24; типу ЕК503 – 28.

Восьмий етап передбачає оцінку вартості обраних систем накопичення.

Вартість обраних систем накопичення за результатами аналізу вартості обраних бортових СНЕ, реверсивних перетворювачів та іншого комплектувального обладнання, наведено у табл. 3.13. В цілому, різниця в вартості конденсаторних модулів різного типу виробництва ЗАТ «ЕЛТОН» незначна. Питома вартість обраних систем накопичення залежно від їх потужності та типу застосованих конденсаторних модулів складає від 0,64 млн. грн. до 2,7 млн. грн. за 1 кВт·год.

Таблиця 3.13 – Вартість обраних систем накопичення

Потужність, кВт	Вартість з урахуванням різної робочої енергоємності бортових СНЕ [кВт·год], млн. грн.											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ЕК303												
2000	-	-	-	-	-	-	4,5	5,2	5,9	6,8	7,6	8,5
3000	-	-	-	-	-	-	5,4	6,2	7,0	7,8	8,7	9,7
ЕК404												
1000	1,0	1,8	2,5	3,1	3,7	4,3	4,9	5,5	6,0	6,5	7,1	7,8
2000	1,5	2,3	3,0	3,6	4,2	4,9	5,5	6,1	6,7	7,2	7,8	8,5
3000	2,0	2,8	3,5	4,1	4,7	5,5	6,1	6,7	7,4	7,9	8,5	9,2
4000	2,5	3,3	4,0	4,6	5,2	6,1	6,7	7,3	8,1	8,6	9,2	9,9
ЕК406												
1000	1,1	1,9	2,6	3,2	3,8	4,3	-	-	-	-	-	-
2000	1,6	2,5	3,2	3,7	4,3	5,0	-	-	-	-	-	-
3000	2,1	3,0	3,7	4,2	4,8	5,5	-	-	-	-	-	-
4000	2,6	3,5	4,2	4,7	5,3	6,2	-	-	-	-	-	-
ЕК503												
1000	1,3	2,0	2,7	3,3	3,9	4,5	5,2	-	-	-	-	-
2000	1,7	2,7	3,4	3,8	4,4	5,1	5,9	-	-	-	-	-
3000	2,2	3,2	3,9	4,3	4,9	5,6	6,4	-	-	-	-	-
4000	2,7	3,7	4,4	4,8	5,4	6,3	7,0	-	-	-	-	-

Дев'ятий етап полягає в оцінці кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення. Процедура досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії за цим етапом є аналогічною до виконання етапу сім попереднього підходу, тому зупинятись на ній детально не має необхідності (див. стор. 45, 46).

Результати з оцінки кількості заощадженої електроенергії за рік для кожної з обраних систем накопичення, приведено в табл. 3.14.

Таблиця 3.14 – Кількість заощадженої електроенергії за рік

Потужність, кВт	Кількість заощадженої електроенергії з урахуванням різної робочої енергоємності бортових СНЕ [кВт·год], млн. кВт·год											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1000	0,08	0,16	0,23	0,27	0,29	0,3	0,3	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32
2000	0,08	0,16	0,23	0,28	0,32	0,35	0,36	0,38	0,38	0,39	0,4	0,4
3000	0,08	0,16	0,23	0,28	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,41
4000	0,08	0,16	0,24	0,28	0,32	0,35	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,41

Десятий етап передбачає побудову характеристики (діаграм) терміну окупності систем накопичення залежно від робочої потужності та енергоємності бортових СНЕ. Величину терміну окупності визначають за формулою (3.11). Результати розрахунку терміну окупності для обраних систем накопичення зображено у вигляді діаграм на рис. 3.12.

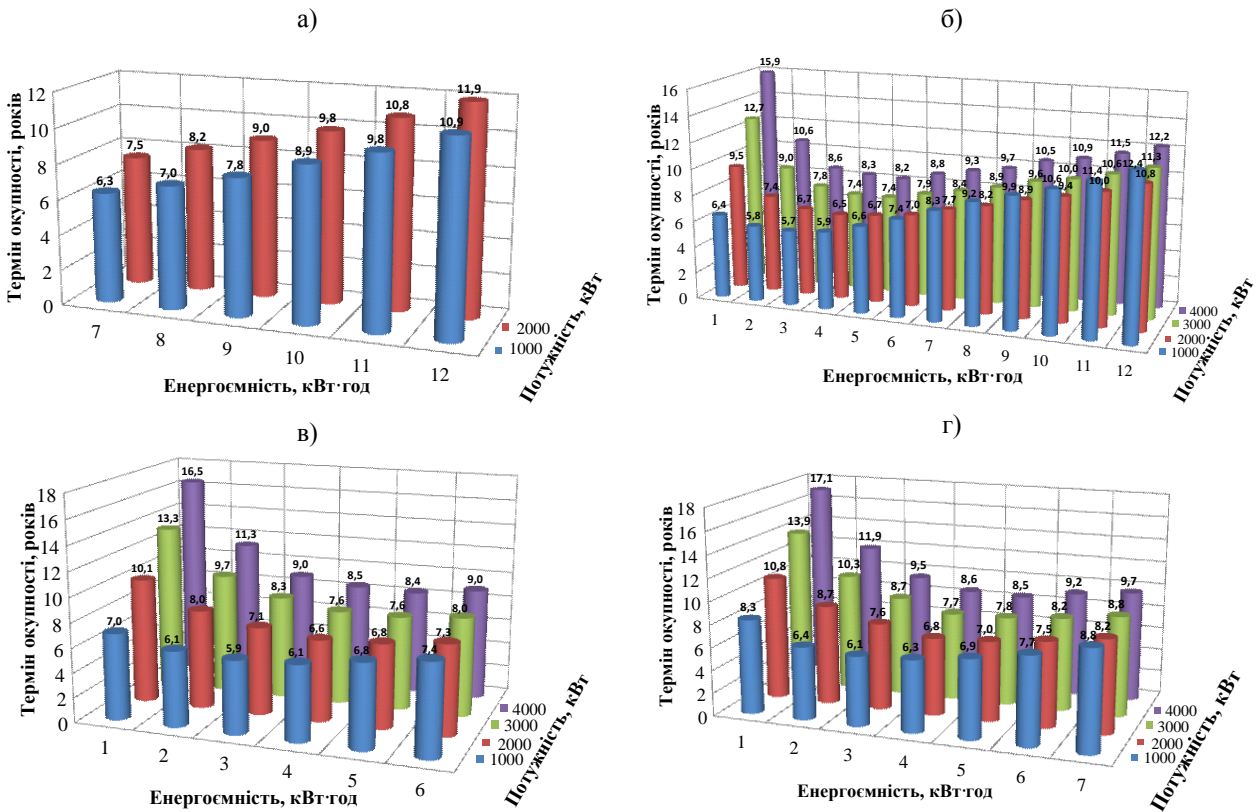


Рис. 3.12 – Діаграми терміну окупності обраних систем накопичення, зібраних з конденсаторних модулів типу EK303 (а), EK404 (б), EK406 (в) та EK503 (г)

Одинадцятий етап. За результатами аналізу діаграм терміну окупності систем накопичення визначають систему з раціональними параметрами.

За результатами аналізу діаграм (рис. 3.12) встановлено наступне:

- з обраних систем накопичення для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену найбільш раціональною є система з величиною робочої енергоємності 3 кВт·год та максимальною потужністю 1 МВт, зібраної з конденсаторних модулів типу EK404. Термін окупності цієї системи мінімальний і складає 5,7 років, а маса близько 1,5 тони;

- максимальний термін окупності має система з величиною робочої енергоємності бортового СНЕ 1 кВт·год та максимальною потужністю 1 МВт, яка зібрана з конденсаторних модулів типу EK503. Термін окупності цієї системи складає близько 17 років;

- динаміка зміни терміну окупності систем накопичення має квадратичний характер за умов збільшення величини енергоємності та при постійному значенні максимально допустимої потужності; термін окупності систем у переважній більшості лінійно зростає за умов збільшення максимальної потужності за сталих значень енергоємності.

З використанням формули (3.12) визначено, що для заданих умов експлуатації впровадження системи накопичення з раціональними параметрами дозволить заощадити 16,1 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу.

На основі двокритеріального підходу виконано дослідження, за результатами яких визначено раціональні параметри бортового СНЕ (максимальну потужність та робочу енергоємність) для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації та виконано кількісну оцінку заощадженої електроенергії від впровадження цієї системи.

3.5 Аналіз результатів досліджень з визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії за розробленими підходами

Для кожного із запропонованих підходів визначено параметри бортового ЄНЕ під час однакових штатних заданих умов експлуатації на одному й тому ж самому рухомому складі метрополітену з системами рекуперації (див. рис. 2.1). Результати визначення параметрів бортового ЄНЕ для кожного з підходів та техніко-економічні показники за умов їх впровадження згідно з [198, 206, 214], наведено в табл. 3.15.

Таблиця 3.15 – Результати порівняльного аналізу

Назва показника	Визначення параметрів бортових ЄНЕ				
	На базі підходів з використанням основних положень теорії імовірності			За мінімальним терміном окупності системи накопичення	За обмеженням маси та мінімальним терміном окупності системи накопичення
	Перший	Другий	Третій		
1	2	3	4	5	6
Максимальна потужність, кВт	3112	3835	3879	1000	1000
Робоча енергоємність, кВт·год	4,58	6,58	4,84	3,0	3,0
Кількість заощадженої електроенергії, %	20,2	27,4	23,0	16,1	16,1
Термін окупності, років	7,5	9,2	8,2	5,7	5,7
Маса системи накопичення, т	2,7	4,3	3,2	1,5	1,5
Примітка. Дані щодо терміну окупності та кількості заощадженої електроенергії наведено за умов використання бортових ЄНЕ типу ЕК404 виробництва ЗАТ «Елтон»					

Результати визначення параметрів та їх порівняльний аналіз (табл. 3.15), отриманих за допомогою запропонованих підходів, дозволив встановити наступне:

– *підходи з використанням основних положень теорії імовірності* передбачають просте виконання розрахунків завдяки чому з'являється можливість швидкого отримання результатів визначення параметрів. При цьому неможливо визначити раціональні параметри бортового ЄНЕ. За результатами визначення параметрів з використанням цих підходів встановлено, що для заданих режимів ведення рухомого складу метрополітену максимальна потужність ЄНЕ має становити від 3112 кВт до 3879 кВт, робоча енергоємність ЄНЕ – в межах (4,6–6,6) кВт·год. Термін окупності цих систем накопичення складатиме від 7,5 років до 9,2 років, маса – (2,7–4,3) т. Впровадження зазначених систем накопичення дозволить заощадити від 20,2 % до 27,4 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу;

– *підхід за мінімальним терміном окупності системи накопичення* дозволяє визначити раціональні параметри за досить важливим техніко-економічним параметром. Серед недоліків підходу – неможливість урахування впливу обраної системи на динаміку руху поїзда. У порівнянні з вищенаведеними підходами необхідно більше часу для аналізу та визначення параметрів. За результатами визначення параметрів з використанням цього підходу встановлено, що для заданих режимів ведення рухомого складу метрополітену максимальна потужність бортового ЄНЕ повинна складати 1000 кВт, робоча енергоємність – 3 кВт·год. Термін окупності цих систем накопичення складає близько 5,7 років, маса – 1,5 т. Впровадження системи накопичення з визначеними раціональними параметрами дозволить заощадити на рівні 16,1% від об'єму спожитої електроенергії поїздом на тягу;

– *двокритеріальний підхід* дозволяє визначити раціональні параметри відразу за двома критеріями – масою та терміном окупності системи накопичення. У порівнянні з іншими підходами потрібно найбільше часу для аналізу та визначення параметрів, однак цей підхід дозволяє враховувати відразу декілька основних факторів впливу під час вибору системи накопичення з раціональними параметрами.

Оскільки двокритеріальний підхід дозволяє визначити раціональні параметри бортового ЄНЕ для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації з урахуванням відразу декількох важливих критеріїв вибору, тому в подальшій роботі під час створення енергоощадного поїзда з бортовим ЄНЕ рекомендовано взяти за основу саме цей підхід.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці математичних моделей, які б дозволяли визначити параметри руху рухомого складу метрополітену з системами рекуперації за заданих умов його ведення. При цьому обов'язковою складовою є апробація цих моделей шляхом порівняння результатів досліджень, отриманих за допомогою розроблених математичних моделей та в процесі експериментальних досліджень (кореляція даних). Перехід від експериментально-розрахункових до теоретичних методів досліджень

параметрів рухомого складу під час його експлуатації з використанням математичних моделей дозволить в значній мірі зменшити час і вартість досліджень з визначення раціональних параметрів бортових ЄНЕ, а також підвищити їх функціональні можливості. Зокрема, з'явиться можливість врахування зміни кількості пасажирів під час посадки та висадки на кожній станції (під час експериментальних досліджень така можливість відсутня).

Висновки за розділом 3

1. Перспективними накопичувачами енергії на залізничному транспорті, зокрема для умов розташування на рухомому складі метрополітену, є електрохімічні, індуктивні, ємнісні та електромеханічні (інерційні).

2. На основі виконаного узагальненого порівняльного аналізу досліджень, та запропонованого підходу з використанням бальної шкали оцінки встановлено, що для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, найбільш раціональним є застосування ємнісних накопичувачів енергії (іоністорів).

3. На поїзді метрополітену не є доцільним застосування БНЕ значної потужності та енергоємності для накопичення, збереження і акумулювання повного об'єму енергії рекуперативного гальмування. Основні фактори, які стримують впровадження бортових ЄНЕ значної потужності та енергоємності є наявні обмеження в технології виробництва, вартісні та масогабаритні показники. Тому, з урахуванням зазначених факторів на даний час найбільш перспективним виглядає впровадження технічних рішень, за яких застосовуються системи накопичення малої потужності та енергоємності.

4. З використанням основних положень теорії імовірності на основі запропонованих підходів та критеріїв оцінки виконані дослідження, результати яких дозволили встановити необхідні параметри бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації. За результатами цих досліджень встановлено, що для заданих умов експлуатації рухомого складу номінальна потужність ЄНЕ має становити від 870 кВт до 1314 кВт, максимальна потужність – в межах (3112–3879) кВт, робоча енергоємність – в межах (4,58–6,58) кВт·год, загальна енергоємність ЄНЕ – в межах (5,27–7,57) кВт·год.

5. Удосконалено ідею та створено науковий підхід щодо визначення раціональної енергоємності та потужності бортового ЄНЕ під час експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації для заданих умов, заснований на виконанні техніко-економічних досліджень з подальшим аналізом діаграм за критерієм мінімального терміну окупності обраних систем накопичення. За результатами виконаних досліджень встановлено, що для заданих умов експлуатації рухомого складу раціональним є застосування системи накопичення з бортовим ЄНЕ робоча енергоємність якого складає 3 кВт·год, а максимальна потужність – 1000 кВт. Визначено, що термін окупності цієї системи складає 5,7 років, а маса близько 1,5 тони.

6. Удосконалено методи та процедури вибору параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії, які ґрунтуються на застосуванні основних положень теорії імовірності та вартісного аналізу, в частині врахування особливостей реальних штатних добових умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, розроблення нових підходів та критеріїв оцінки, автоматизації етапів досліджень, що дозволяє скоротити час та поліпшити якість виконання науково-дослідних робіт зі створення енергоефективного рухомого складу метрополітену.

7. Вперше запропоновано двокритеріальний підхід, який дозволяє визначати раціональні параметри бортового ємнісного накопичувача енергії для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, з урахуванням масових та вартісних показників системи накопичення.

8. Встановлено, що для заданих умов експлуатації впровадження систем накопичення з раціональними параметрами, які визначено за критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення та запропонованим двокритеріальним підходом, дозволить заощадити на рівні 16,1 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу.

9. Дістала подальшого розвитку теорія створення енергоощадного рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, яка заснована на впровадженні як додаткового джерела живлення – бортового ємнісного накопичувача енергії, що дозволить ефективно використовувати енергію рекуперативного гальмування поїзда та розширити його технічні можливості.

Подальші дослідження необхідно зосередити на виборі раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, шляхом застосування теоретичних методів досліджень з використанням програмних засобів замість даних експериментальних досліджень, що дозволить в значній мірі зменшити час і вартість таких досліджень.

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

4.1 Програмне забезпечення для моделювання руху складу метрополітену з системами рекуперації під час заданих режимів його ведення

Методи та підходи, які наведено та розроблено в попередньому розділі, що базуються на проведенні експериментальних досліджень енергетичних процесів між контактною мережею та тяговим електроприводом під час заданих умов експлуатації рухомого складу, мають ряд недоліків. Основним недоліком зазначених методів та підходів є значні фінансові витрати на виконання експериментальних досліджень. Враховуючи зазначене, для оцінки раціональних параметрів бортового СНЕ, необхідно розробити програмне забезпечення для моделювання руху поїзда метрополітену з системами рекуперації, що здатне досліджувати реальні динамічні і енергетичні процеси під час штатних умов його експлуатації.

Аналіз робіт [198, 206, 215] показав, що вирішенню цього питання приділено недостатньо уваги. Використання такого програмного забезпечення дозволить зменшити витрати та пришвидшити виконання досліджень з визначення раціональної потужності та енергоємності бортового СНЕ для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації. Тому, цей пункт розділу присвячено розробці програмного забезпечення для дослідження динамічних якостей руху та енергетичних показників під час заданих умов ведення рухомого складу метрополітену з системами рекуперації.

Перед розробкою програмного забезпечення проаналізовано наявні математичні моделі, які дозволяють описувати динамічні якості та енергетичні процеси під час руху поїзда метрополітену, та прийняті в цих моделях припущення. За результатами цього аналізу встановлено, що основу будь-якої математичної моделі складає диференційне рівняння руху поїзда, яке отримано на підставі другого закону Ньютона [185, 211, 212, 216]. При цьому в математичних моделях зазвичай приймаються наступні припущення: вся маса поїзда зосереджена в центрі тяжіння, а рух поїзда розглядається як рух матеріальної точки або поїзд розглядається як «нерозтяжима жорстка нитка» з урахуванням його довжини. В першому випадку, під час вирішення рівняння руху поїзда опір від ухилу профілю на кроці інтегрування приймається рівним опору руху на ухилі, на якому знаходиться центр поїзда. В іншому випадку (моделі є більш точними), припускається, що маса поїзда рівномірно розподілена по його довжині та враховується, що поїзд одночасно знаходиться на декількох елементах профілю.

З урахуванням вищезазначеного, для описання динамічних і енергетичних процесів під час заданих умов ведення рухомого складу метрополітену з системами рекуперації запропоновано використовувати математичну модель [217, 218], яка представлена у вигляді системи рівнянь (4.1):

$$\left\{ \begin{array}{l} F = m \frac{dV}{dt} (1 + \gamma) + W_{\text{оч}} \pm W_i ; \\ W_{\text{оч}} = BV^2 + CV + D; \\ W_i = mgi; \\ A_{\text{мереж}} = A_{\text{тяги}} - A_{\text{рек}}; \\ A_{\text{тяги}} = \frac{U_{\text{кмтяги}} \cdot \int_0^t I_{\text{тяги}} dt}{3600}; \\ A_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{кмрек}} \cdot \int_0^t I_{\text{рек}} dt}{3600}; \\ I_{\text{тяги}} = \frac{FV}{U_{\text{кмтяги}} \eta_{\text{р}} \eta_{\text{тд}} \eta_{\text{ред}}}; \\ I_{\text{рек}} = \frac{FV \eta_{\text{р}} \eta_{\text{тд}} \eta_{\text{ред}}}{U_{\text{кмрек}}}; \eta_{\text{тд}} = f(V), \end{array} \right. \quad (4.1)$$

де F – сила тяги (гальмування) рухомого складу;

- m – маса рухомого складу;
- V – швидкість руху;
- t – поточний час;
- $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових мас;
- $W_{осн}$ – основний опір руху;
- W_i – додатковий опір руху від приведенного ухилу;
- g – значення прискорення вільного падіння;
- B, C, D – коефіцієнти, які залежать від конструкції рухомого складу;
- i – приведений ухил;
- $A_{мережі}$ – кількість спожитої електроенергії з контактної мережі;
- $A_{тяги}$ – кількість спожитої електроенергії в режимі тяги;
- $A_{рек}$ – кількість електроенергії, що віддається в режимі рекуперативного гальмування;
- $U_{кМТЯГИ}$ – напруга контактної мережі в режимі тяги;
- $U_{кМРЕК}$ – напруга контактної мережі в режимі рекуперативного гальмування;
- $I_{ТЯГИ}$ – струм, що споживається рухомим складом в режимі тяги;
- $I_{РЕК}$ – струм, що генерується рухомим складом в режимі рекуперативного гальмування;
- $\eta_{рП}$ – ККД реверсивного перетворювача;
- $\eta_{ТД}$ – ККД тягового двигуна;
- $\eta_{ред}$ – ККД редуктора.

В запропонованій математичній моделі (4.1) прийнято наступні припущення: рухомий склад розглядається як матеріальна точка з центром тяжіння по середині; напруга контактної мережі для заданих режимів тяги, вибігу, рекуперативного гальмування є величиною незмінною. Слід зазначити, що розроблена математична модель дозволяє враховувати конструктивні та технічні особливості складу, зміну ККД тягового двигуна залежно від швидкості руху, а також досліджувати енергетичні процеси в режимі рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену.

В подальшому з використанням рівнянь математичної моделі (4.1) розроблено процедуру, яка дозволяє досліджувати динамічні та енергетичні показники під час заданих режимів ведення рухомого складу метрополітену. Алгоритм цієї процедури досліджень зображено на рис. 4.1.

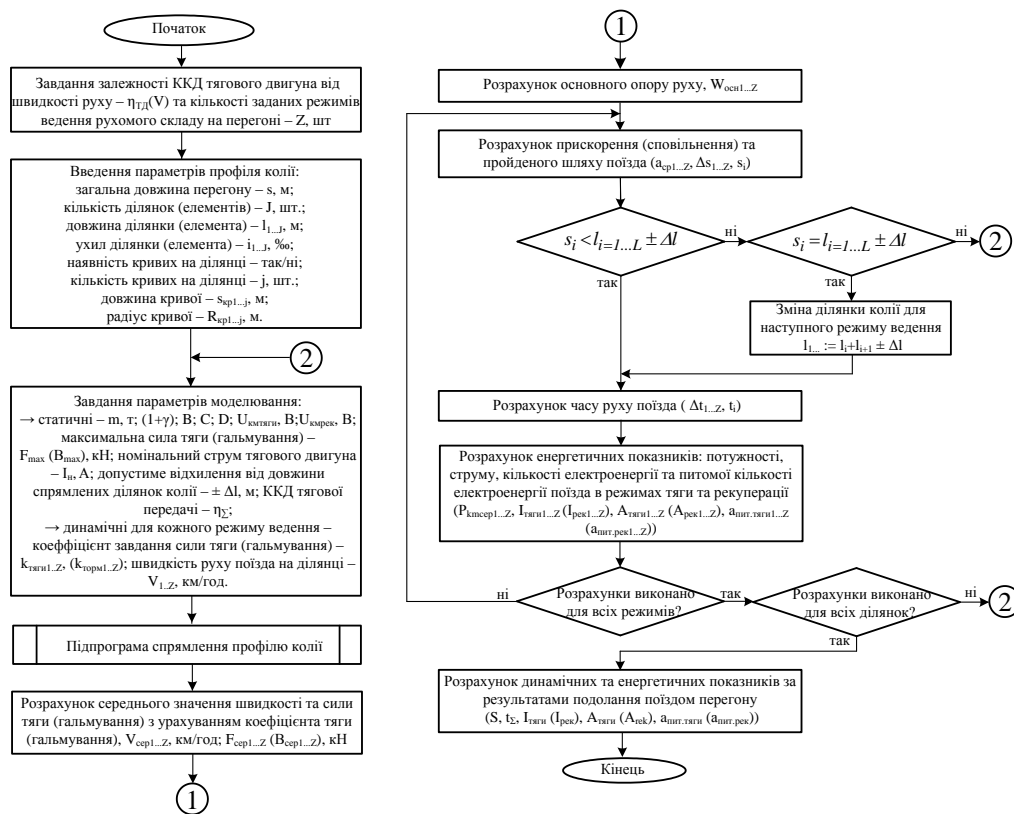


Рис. 4.1 – Алгоритм процедури досліджень динамічних та енергетичних показників під час заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації

Процедура досліджень включає етапи обчислень та розрахунків, суть яких наведено нижче.

1) Задається енергетична характеристика (залежність ККД тягового двигуна від швидкості руху) та кількість заданих режимів ведення рухомого складу на перегоні.

2) Вводяться параметри профілю колії: загальна довжина перегону (s), кількість ділянок (J), довжина кожної ділянки ($l_{1...J}$), ухил кожної ділянки ($i_{1...j}$), наявність кривих на кожній з ділянок (так/ні), у випадку наявності кривих на ділянці, вказується їх кількість (j), для кожної кривої – довжина ($s_{кр1} \dots s_{крj}$), та радіус ($R_{кр1} \dots R_{крj}$).

3) Задаються параметри моделювання:

– статичні (m ; $1+\gamma$; B ; C ; D ; $U_{кмтяги}$; $U_{кмрек}$); максимальна сила тяги (гальмування) – F_{max} (B_{max}); номінальний струм тягового двигуна – $I_{ц}$; допустиме відхилення від довжини спрямлених ділянок колії – $\pm \Delta l$; ККД тягової передачі – $\eta_{\Sigma} = \eta_{рп} \cdot \eta_{ред}$.

– динамічні для кожного режиму ведення – коефіцієнт завдання сили тяги (гальмування) – $k_{тяги1...Z}$, $k_{гальм1...Z}$; швидкість руху поїзда на ділянці – $V_{1...Z}$.

4) Виконується підпрограма спрямлення профілю колії, опис та методику розрахунків якої більш детально наведено в роботах [185, 211, 216]. Алгоритм роботи підпрограми спрямлення профілю колії зображено на рис. 4.2.

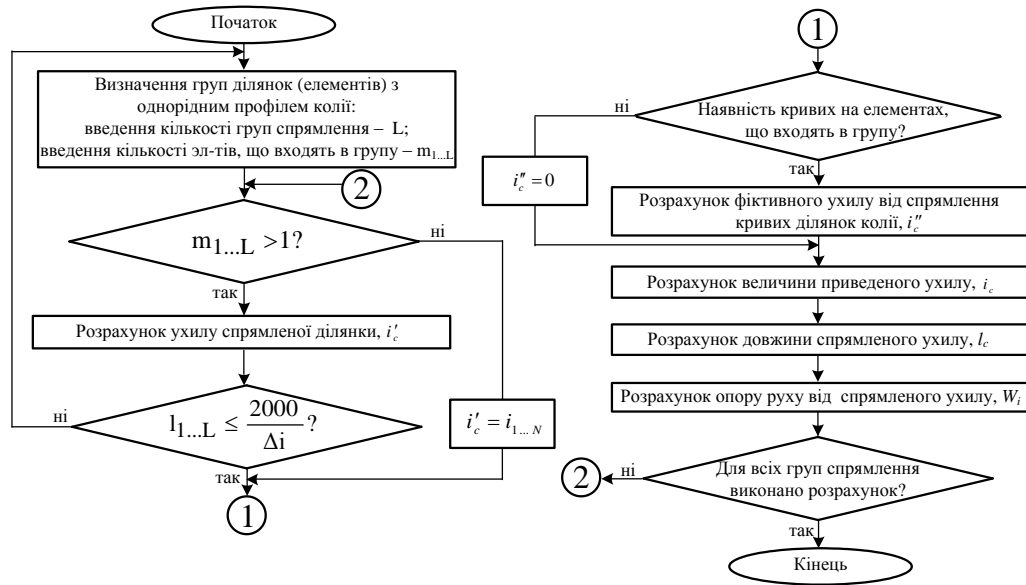


Рис. 4.2 – Алгоритм роботи підпрограми спрямлення профілю колії

5) Розраховуються середні значення швидкості та сили тяги (гальмування) з урахуванням коефіцієнта тяги (гальмування) за формулами (4.2) та (4.3):

$$V_{cp1...Z} = \frac{(V_i + V_{i+1})}{2}; \quad (4.2)$$

$$F_{cp1...Z} = \frac{(k_i F_{max}(B_{max}) + k_{i+1} F_{max}(B_{max}))}{2}; \quad (4.3)$$

6) Обчислюється основний опір руху за формулою (4.4):

$$W_{осн.1...Z} = (B V_{1...Z}^2 + C V_{1...Z} + D) 9,81 m. \quad (4.4)$$

7) Виконується розрахунок прискорення (сповільнення) поїзда за формулою (4.5):

$$a_{cp1...Z} = \frac{(F_{cp1...Z}(B_{cp1...Z}) - W_{осн.1...Z} \pm W_{il...L})}{m(1+\gamma)} \quad (4.5)$$

8) Після розрахунку прискорення (сповільнення) перевіряється умова: « $a_{cp1...Z} = 0?$ ». Якщо умова виконується, тоді оператором задається значення пройденого шляху $\Delta s_{1...Z}$. В іншому випадку виконується розрахунок:

– пройденого шляху під час зміни швидкості [185, 211, 212, 216] за формулою (4.6):

$$\Delta s_{1...Z} = \frac{m(1+\gamma)}{(F(B)_{cp1...Z} - W_{осн.1...Z} \pm W_{il...L})} \int_{V_i}^{V_{i+1}} V dV = \frac{m(1+\gamma)(V_{i+1}^2 - V_i^2)}{25,92(F(B)_{cp1...Z} - W_{осн.1...Z} \pm W_{il...L})}; \quad (4.6)$$

– поточного пройденого шляху [211, 212, 215, 216] за формулою (4.7):

$$s_i = s_{i-1} + \Delta s_i. \quad (4.7)$$

9) Перевіряється умова « $(s_i < l_{i=1...L} \pm \Delta l)$?».

Якщо умова виконується, тоді розраховується час руху під час зміни швидкості для заданого режиму ведення та поточний час руху поїзда. В іншому випадку перевіряється умова « $(s_i = l_{i=1...L} \pm \Delta l)$?».

10) Перевіряється умова « $(s_i = l_{i=1...L} \pm \Delta l)$?».

Якщо умова виконується, тоді відбувається зміна ділянки колії для наступного режиму ведення та розраховується час руху під час зміни швидкості та поточний час руху поїзда для заданого режиму ведення. При цьому розрахунок показників для заданого режиму ведення виконується для поточної ділянки спрямленого профілю колії.

В іншому випадку необхідно ввести коригування вхідних даних (збільшити допустиме відхилення від довжини спрямлених ділянок колії або змінити режим ведення).

11) Обчислюється час за зміни швидкості рухомого складу та поточний час руху:

– час руху за зміни швидкості поїзда за однією з приведених формул (4.8) та (4.9) [185, 211, 212, 216]:

$$\Delta t_{1...Z} = \frac{m(1+\gamma)}{(F(B)_{cp1...Z} - W_{ocn.1...Z} \pm W_{i1...L})} \int_{V_i}^{V_{i+1}} dV = \frac{m(1+\gamma)(V_{i+1...Z} - V_{i...Z})}{3,6(F(B)_{cp1...Z} - W_{ocn.1...Z} \pm W_{i1...L})}; \quad (4.8)$$

$$\Delta t_{1...Z} = \frac{(V_{i+1...Z} - V_{i...Z})}{a_{cp1...Z}}; \quad (4.9)$$

– поточний часу руху за формулою (4.10) [184, 209, 212, 216]:

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i. \quad (4.10)$$

12) Розраховуються енергетичні показники для заданого режиму ведення: середнє значення потужності на ободах коліс, середніх значень струмів споживання (рекуперації), витрат (рекуперації) та питомих витрат (рекуперації) електроенергії:

– середнє значення потужності на ободах коліс під час зміни швидкості за формулою (4.11) [185, 211]:

$$P_{кмcp1...Z} = \frac{F_{cp1...Z}(B_{cp1...Z})V_{cp1...Z}}{3,6}. \quad (4.11)$$

– середніх значень струмів споживання та рекуперації за формулами (4.12) та (4.13) [185, 211, 212]:

$$I_{тяги1...Z} = \frac{1000P_{кмcp1...Z}}{U_{кмтяги}\eta_{\Sigma}\eta_{ТД}}; \quad (4.12)$$

$$I_{рек1...Z} = \frac{1000P_{кмcp1...Z}\eta_{\Sigma}\eta_{ТД}}{U_{кмрек}}. \quad (4.13)$$

– витрат (рекуперації) та питомих витрат (рекуперації) електроенергії за формулами (4.14)–(4.17) [185, 211, 212, 216]:

$$A_{тяги1...Z} = \frac{I_{тяги1...Z}U_{кмтяги}\Delta t_{1...Z}}{3,6 \cdot 10^6}; \quad (4.14)$$

$$A_{рек1...Z} = \frac{I_{рек1...Z}U_{кмрек}\Delta t_{1...Z}}{3,6 \cdot 10^6}; \quad (4.15)$$

$$a_{пит.тяги1...Z} = \frac{I_{тяги1...Z}U_{кмтяги}\Delta t_{1...Z}}{3,6m \cdot \Delta s_{1...Z}}; \quad (4.16)$$

$$a_{пит.рек1...Z} = \frac{I_{рек1...Z}U_{кмрек}\Delta t_{1...Z}}{3,6m \cdot \Delta s_{1...Z}}. \quad (4.17)$$

13) Перевіряється умова «Розрахунки виконано для всіх режимів?».

Якщо умова виконується, тоді перевіряється інша умова «Розрахунки виконано для всіх ділянок?» В іншому випадку виконуються розрахунки для наступного режиму ведення.

14) Перевіряється умова «Розрахунки виконано для всіх ділянок?».

Якщо умова виконується, тоді розраховуються динамічні та енергетичні показники за результатом подолання рухомим складом перегону. В іншому випадку з'являється повідомлення про необхідність коригування вхідних даних (введення додаткових параметрів профіля колії). При цьому оператор має можливість коригувати вхідні дані або перейти до виконання розрахунків динамічних та енергетичних показників для заданих режимів ведення. У разі закінчення спрямлених ділянок колії за умов наявності режимів ведення має з'явитись повідомлення про необхідність коригування вхідних даних.

15) Розраховуються динамічні та енергетичні показники за результатом подолання поїздом перегону за формулами (4.18) – (4.25) [185, 211, 212, 216]:

$$S = \sum_{i=1}^J \Delta s_i; \quad (4.18)$$

$$t_{\Sigma} = \sum_{i=1}^J \Delta t_i; \quad (4.19)$$

$$I_{\text{тяги}} = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^J I_{\text{тяги}_i} \cdot t_{\text{тяги}_i}; \quad (4.20)$$

$$I_{\text{рек}} = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^J I_{\text{рек}_i} \cdot t_{\text{рек}_i}; \quad (4.21)$$

$$A_{\text{тяги}} = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^J A_{\text{тяги}_i} \cdot t_{\text{тяги}_i}; \quad (4.22)$$

$$A_{\text{рек}} = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^J A_{\text{рек}_i} \cdot t_{\text{рек}_i}; \quad (4.23)$$

$$a_{\text{пит.тяги}} = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^J a_{\text{пит.тяги}_i} \cdot t_{\text{тяги}_i}; \quad (4.24)$$

$$a_{\text{пит.рек}} = \frac{1}{t} \cdot \sum_{i=1}^J a_{\text{пит.рек}_i} \cdot t_{\text{рек}_i}; \quad (4.25)$$

З використанням запропонованої математичної моделі (4.1) та процедури досліджень розроблено програмне забезпечення (ПЗ) «Motion Simulation» (далі – ПЗ) для моделювання руху поїзда з системами рекуперації під час заданих умов його ведення [218, 219]. При цьому розроблене ПЗ дозволяє автоматизувати розрахунок динамічних та енергетичних показників. Вищезазначене ПЗ включає в себе підпрограму «Спрямлення», алгоритм роботи якої зображено на рис. 4.2. Підпрограма «Спрямлення» дозволяє спростити розрахунки та згладити зміни сили додаткового опору під час переходу з одного профілю колії на інший. Сутність спрямлення колії полягає в заміні заданого профілю на еквівалентний, який має меншу кількість ділянок колії та в якому криві замінено на фіктивні ухили.

Програми розроблені в середовищі графічного програмування LabVIEW, головними перевагами якого є можливість реалізації алгоритмів високого рівня складності, простота реалізації, наявність зручного графічного інтерфейсу.

Зовнішній вигляд графічного інтерфейсу оператора програми «Motion Simulation», зображено на рис. 4.3. Інтерфейс програми умовно поділений на кілька фрагментів за їх функціональним призначенням. Так можна виділити блок вводу статичних параметрів, блок вводу динамічних параметрів, блок управління програмою, блок відображення результатів та блок графічної індикації.

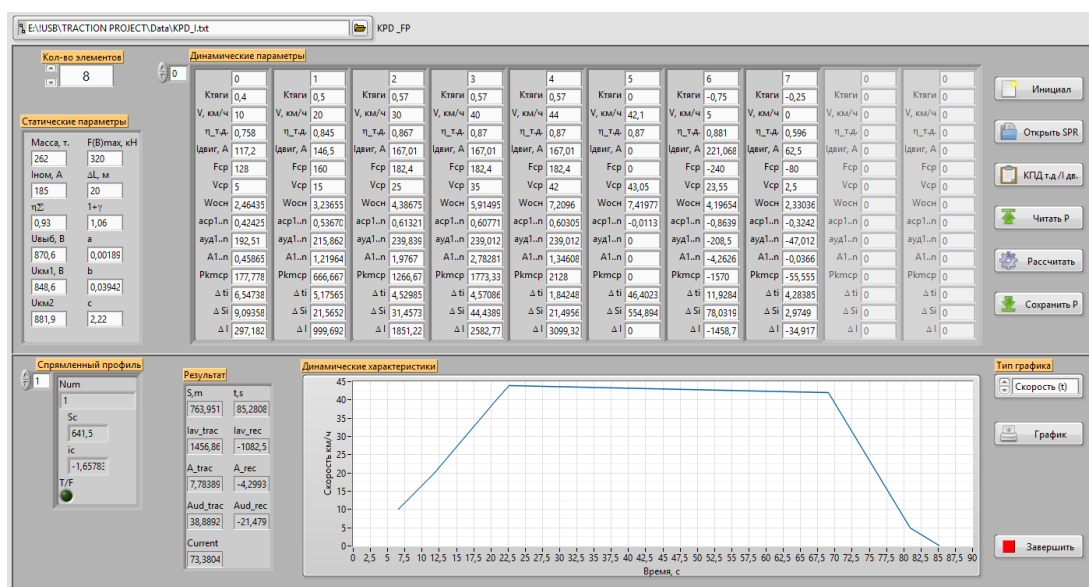


Рис. 4.3 – Загальний вигляд інтерфейсу ПЗ «Motion Simulation»

Після запуску програма розпочинає роботу в режимі очікування. Перед переведенням програми в робочий режим оператор повинен вказати шлях до файлу даних, який містить параметри двигуна, що моделюється, через позначку з папкою 1 та задати кількість елементів (режимів ведення) в вікні з позначкою 2 (рис. 4.4, а). На рис. 4.4, б представлено блок управління програмою, який містить шість двійкових перемикачів для керування основним функціоналом. Так після вводу даних через позначку з папкою 1 та у вікні з позначкою 2 необхідно натиснути регулятор «Ініціал».

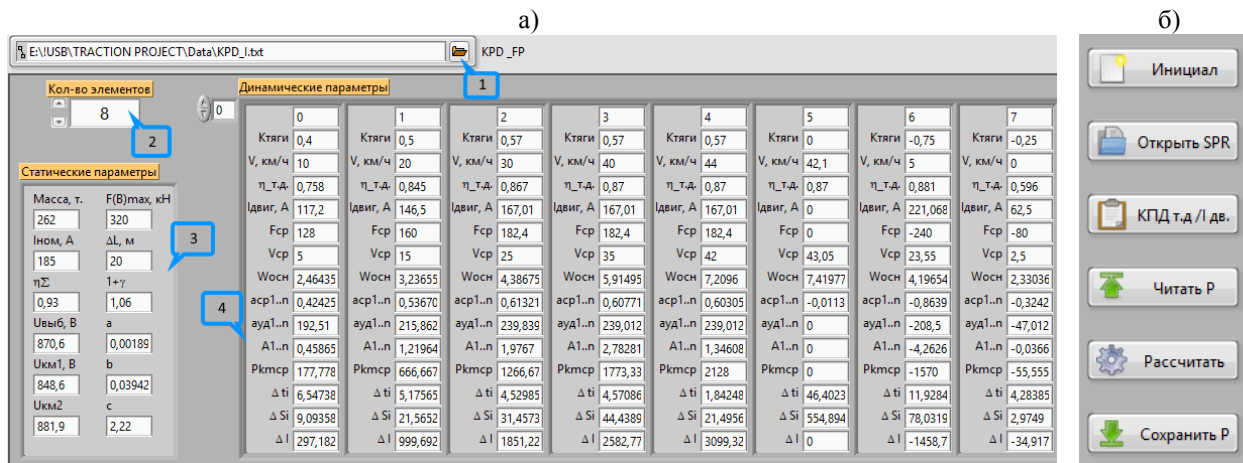


Рис. 4.4 – Зовнішній вигляд блоку вводу статичних і динамічних параметрів (а) та блоку управління (б) ПЗ «Motion Simulation»

Програма проведе початкову ініціалізацію та буде очікувати введення параметрів моделювання. Необхідно вручну ввести статичні та динамічні ($K_{тяги}$, $V_{км/год}$) параметри моделювання відповідно у вікна з позначеннями 3 та 4. (рис. 4.4, а) та натиснути регулятор управління «КПД т.д./И дв.». За допомогою паспортних даних визначеного типу двигуна, що містяться в зовнішньому файлі (позначка 1 рис. 4.4, а) програма проведе початковий розрахунок ККД тягового двигуна та споживаної сили струму залежно від введених $K_{тяги}$ та $V_{км/год}$. Результати цього розрахунку будуть занесені у відповідні поля масиву даних «Динамічні параметри» (позначка 4 рис. 4.4, а). Коли перераховані вище кроки виконані, оператор має змогу зберегти введені дані в зовнішніх файлах у форматі *.xml для подальшого використання. Так статичні параметри будуть збережені в файлі «nameA.xml», а динамічні – у файлі «nameB.xml». Для виконання такого збереження необхідно натиснути регулятор «Сохранить P» (рис. 4.4, б). Відповідно для заповнення параметрів лицевої панелі даними з раніше збережених файлів необхідно натиснути регулятор «Читать P» та з діалогу відкриття файлів обрати файл «nameA.xml».

Після успішної ініціалізації для виконання основного розрахунку динамічних та енергетичних параметрів під час заданого режиму ведення рухомого складу метрополітену необхідно завантажити файл даних зі спрямленим профілем перегону, отриманим на виході створеної раніше підпрограми «Спрямлення». Для цього оператор має натиснути регулятор «Открыть SPR» та вибрати відповідний файл даних. Після завантаження оператор, в разі необхідності, може перевірити коректність даних за допомогою регулятора «Спрямлений профіль» (рис. 4.3).

Після введення всіх параметрів та вводу даних з зовнішніх файлів для виконання моделювання необхідно натиснути регулятор «Рассчитать». При цьому проміжні результати розрахунку будуть занесені в основний масив даних (позначка 4 рис. 4.4, а), а підсумкові – в окремий кластер індикаторів «Результат» (рис. 4.3).

Після завершення розрахунків результати можуть бути представлені в графічному вигляді на індикаторі «Динамические параметры». Для цього необхідно вибрати один з чотирьох доступних режимів відображення «Тип графика»: швидкість (час); швидкість (шлях); струм (час); струм (шлях). Після чого натиснути регулятор «График».

Послідовність роботи з ПЗ «Motion Simulation»:

- запустити ПЗ «Motion Simulation» на виконання;
- вказати шлях до файлу «KPD_I.txt» і кількість елементів (режимів ведення) на перегоні та натиснути «Ініціал»;
- ввести статичні та динамічні параметри моделювання вручну або за допомогою «Читать P»;
- завантажити дані для спрямленого перегону за допомогою «Открыть SPR»;
- провести моделювання, натиснувши кнопку «Рассчитать»;
- виконати графічне відображення результатів (за необхідністю). Вибрати тип графіку, що буде побудовано, та натиснути «График»;
- натиснути двійковий регулятор «Завершить» для повного виходу з програми.

Оцінку придатності розробленого ПЗ «Motion Simulation» виконано за точністю визначення основних вихідних динамічних та енергетичних параметрів під час заданих умов руху поїзда. Алгоритм тестування та оцінки заснований на принципі порівняння результатів досліджень, виконаних за допомогою ПЗ «Motion Simulation» та випробувального комплексу (рис. 2.1), за однакових заданих умов експлуатації.

Методика тестування та оцінки ПЗ «Motion Simulation» складалась з чотирьох окремих експериментів. При цьому для кожного експерименту тягово-енергетичні характеристики поїзда однакові, режим ведення та профіль колії – різний. Теоретичні дослідження за допомогою ПЗ виконані в лабораторних умовах (в приміщенні інституту) за таких параметрів навколишнього середовища: температура повітря 21 °С, відносна вологість 40 %. Експериментальні дослідження за допомогою випробувального комплексу виконані в умовах КП «Київський метрополітен» під час експлуатації дослідного рухомого складу метрополітену на ділянці «Арсенальна–Університет» Святошинсько-Броварської лінії за параметрів навколишнього середовища: температура повітря 19 °С, відносна вологість 62 %. Умови проведення експериментів наступні:

– досліджувана ділянка «Арсенальна–Хрещатик» (режим ведення поїзда наступний: розгін до швидкості 64 км/год – режим вибігу – гальмування зі швидкістю на початку гальмування 46 км/год);

– досліджувана ділянка «Хрещатик–Театральна» (режим ведення поїзда наступний: розгін до швидкості 44 км/год – режим вибігу – гальмування зі швидкістю на початку гальмування 42 км/год);

– досліджувана ділянка «Театральна–Університет» (режим ведення поїзда наступний: розгін до швидкості 49 км/год – режим вибігу – гальмування зі швидкістю на початку гальмування 38 км/год);

– досліджувана ділянка «Арсенальна–Університет», яка включає відповідно перегони «Арсенальна–Хрещатик», «Хрещатик–Театральна» та «Театральна–Університет». (режим ведення поїзда аналогічний вказаному на перелічених перегонах).

Під час визначення одного або декількох вихідних параметрів похибка оцінювалась в такий спосіб:

– абсолютна похибка між даними, що отримані в результаті досліджень за допомогою ПЗ «Motion Simulation» та випробувального комплексу за рівнянням (4.26):

$$\Delta = |X_{MS} - X_{BK}|, \quad (4.26)$$

де X_{MS} – значення параметру, отриманого в ПЗ «Motion Simulation»;

X_{BK} – значення параметру, отриманого за допомогою випробувального комплексу;

– відносна похибка за рівнянням (4.27):

$$\delta = \frac{|X_{MS} - X_{BK}|}{X_{BK}} \cdot 100, \quad (4.27)$$

Результати порівняння досліджень, виконаних за допомогою ПЗ «Motion Simulation» та випробувального комплексу, наведено у табл. 4.1–4.4.

Таблиця 4.1 – Результати досліджень на ділянці «Арсенальна–Хрещатик»

Досліджуваний параметр	ПЗ «Motion Simulation»	Випробувальний комплекс	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %	Максимальна похибка, %
S, м	1666,7	1665,5	1,2	0,07	4,8
t, с	131,0	129,0	2,0	1,53	
I _{тяги} , А	1936,5	2011,3	74,8	3,7	
I _{рек} , А	-1072,8	-1118,9	46,1	4,1	
A _{тяги} , кВт·год	12,03	12,54	0,51	4,1	
A _{рек} , кВт·год	-5,01	-4,78	0,23	4,6	
a _{пит.тяги} , Вт·год/т·км	27,55	28,74	1,19	4,1	
a _{пит.рек} , Вт·год/т·км	-10,94	-11,49	0,55	4,8	

Таблиця 4.2 – Результати досліджень на ділянці «Хрещатик–Театральна»

Досліджуваний параметр	КП "Motion Simulation"	Випробувальний комплекс	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %	Максимальна похибка, %
S, м	764,0	770,4	6,4	0,83	4,7
t, с	85,3	83	2,3	2,7	
I _{тяги} , А	1456,9	1528,5	71,6	4,7	
I _{рек} , А	-1082,5	-1118,6	36,1	3,2	
A _{тяги} , кВт·год	7,78	8,11	0,33	4,1	
A _{рек} , кВт·год	-4,3	-4,11	0,19	4,4	
a _{пит.тяги} , Вт·год/т·км	38,89	40,16	1,27	3,2	
a _{пит.рек} , Вт·год/т·км	-21,48	-20,63	0,85	4,0	

Таблиця 4.3 – Результати досліджень на ділянці «Театральна–Університет»

Досліджуваний параметр	КП "Motion Simulation"	Випробувальний комплекс	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %	Максимальна похибка, %
S , м	898,0	882,3	15,7	1,7	4,1
t , с	92,2	88,5	3,7	4,0	
$I_{тяги}$, А	1688,8	1753,1	64,3	3,7	
$I_{рек}$, А	-747,1	-772,0	24,9	3,2	
$A_{тяги}$, кВт·год	9,15	9,2	0,05	0,54	
$A_{рек}$, кВт·год	-3,74	-3,9	0,16	4,1	
$a_{пит.тяги}$, Вт·год/т·км	38,87	39,81	0,94	2,4	
$a_{пит.рек}$, Вт·год/т·км	-16,6	-16,2	0,4	2,4	

Таблиця 4.4 – Результати досліджень на ділянці «Арсенальна–Університет»

Досліджуваний параметр	КП "Motion Simulation"	Випробувальний комплекс	Абсолютна похибка	Відносна похибка, %	Максимальна похибка, %
S , м	3321,2	3318,2	3	0,09	4,8
t , с	308,8	300,5	8,3	2,7	
$I_{тяги}$, А	1727,1	1781,5	54,4	3,1	
$I_{рек}$, А	-942,4	-990,0	47,6	4,8	
$A_{тяги}$, кВт·год	28,88	29,85	0,97	3,2	
$A_{рек}$, кВт·год	-12,87	-12,79	0,08	0,62	
$a_{пит.тяги}$, Вт·год/т·км	33,19	31,69	1,5	4,5	
$a_{пит.рек}$, Вт·год/т·км	-14,79	-14,86	0,07	0,47	

Порівняльний аналіз результатів теоретичних та експериментальних досліджень (табл. 4.1–4.4) дозволив встановити, що для заданих однакових вхідних даних (режим ведення поїзда та профіль колії) розбіжність значень основних вихідних параметрів не перевищує 5 %. Отримана розбіжність обумовлена прийнятими припущеннями в математичні моделі. Отже, в цілому збіжність результатів задовільна, що свідчить про правильність та достовірність розробленого програмного забезпечення для моделювання руху поїзда метрополітену з системами рекуперації під час заданих режимів його ведення. Тому, в подальшому проведення вартісних і тривалих експериментальних досліджень з використанням випробувального комплексу (рис. 2.1) запропоновано замінити теоретичними за допомогою розробленого ПЗ «Motion Simulation».

4.2 Процедура визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену з використанням програмного забезпечення «Motion Simulation»

Визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ для рухомого складу метрополітену з системами рекуперації за допомогою розробленого ПЗ «Motion Simulation» включає використання теоретичних методів досліджень. Серед яких слід виділити наступні: теоретичні основи електричної тяги під час виконання тягових розрахунків, математичне моделювання динаміки руху та енергетичних процесів під час експлуатації поїзда метрополітену з системами рекуперації у штатних умовах, сучасні методи математичної статистики для обробки даних математичного моделювання, методи техніко-економічного аналізу для оцінки вартості систем накопичення, аналітичні методи досліджень для визначення кількості заощаджень за умов впровадження систем накопичення, методи порівняльного аналізу для визначення системи накопичення з раціональними параметрами за діаграмами терміну окупності від величин енергоємності та потужності. Цей підхід вибору раціональних параметрів бортового ЄНЕ передбачає поетапну процедуру досліджень (рис. 4.5).

Суть даного підходу полягає у визначенні раціональних параметрів одразу за двома параметрами системи накопичення – масою та терміном окупності. При цьому основною відмінністю від підходу в роботі [214] є те, що в основу цієї процедури покладено теоретичні дослідження, суть яких полягає у моделюванні руху поїзда метрополітену з системами рекуперації за допомогою програмного забезпечення.

Узагальнений математичний опис цільової функції комплексного підходу з визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ можна представити у наступному вигляді за (4.28):

$$F(\bar{X}) \rightarrow \text{extremum}, \bar{X} \in O_1 \dots O_\theta, \quad (4.28)$$

де $F(\bar{X})$ – головний критерій оптимальності;

O – область можливих рішень, яка визначається границями відповідних значень (параметричні обмеження);

θ – кількість прийнятих обмежень для пошуку оптимального рішення.

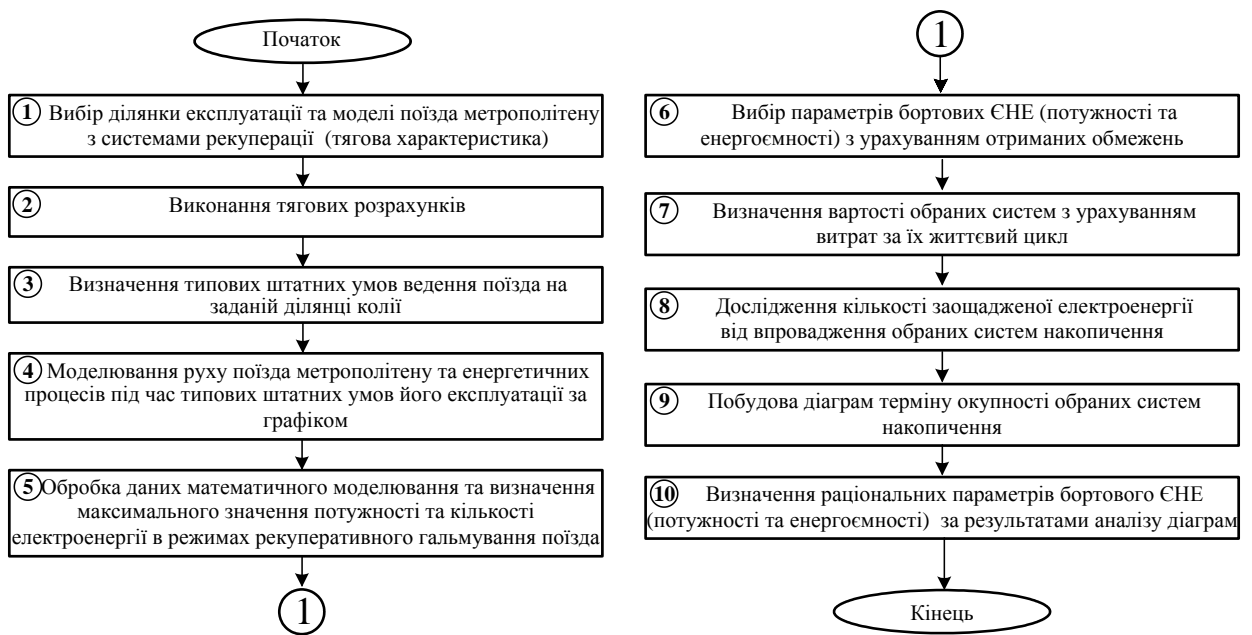


Рис. 4.5 – Процедура визначення раціональних параметрів бортового СНЕ для рухомого складу метрополітену

В нашому випадку основним критерієм оптимізації обрано термін окупності системи накопичення. З урахуванням обраного критерію формулювання задачі оптимізації: знайти такі значення потужності та енергоємності бортового СНЕ ($P_{\text{СНЕ}}$, $A_{\text{СНЕ}}$), за яких виконується умова (4.29):

$$T_{\text{ок}} = F(P_{\text{СНЕ}}, A_{\text{СНЕ}}) \rightarrow \min. \quad (4.29)$$

При цьому, для цільової функції були встановлені такі граничні значення параметрів: $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots P_{\Delta m}]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots A_{\Delta m}]$, $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots P_{\text{max}}]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots A_{\text{рекmax}}]$, де $P_{\Delta m}$, $A_{\Delta m}$ – максимальні значення потужності та енергоємності за масою, які залежать від типу поїзда метрополітену з системами рекуперації та конденсаторних модулів; P_{max} , $A_{\text{рекmax}}$ – максимальні значення потужності та кількості електроенергії рекуперації для заданих штатних умов експлуатації поїзда.

За умов, якщо цільова функція має декілька мінімальних значень, то обирається система накопичення, яка здатна заощаджувати максимальну кількість електроенергії, тобто за (4.30):

$$\alpha = \begin{pmatrix} T_{\text{ок}1} \\ T_{\text{ок}2} \\ \dots \\ T_{\text{ок}\beta} \end{pmatrix} \rightarrow \max. \quad (4.30)$$

де β – кількість систем накопичення з однаковим мінімальним терміном окупності;

α – кількість заощадженої електроенергії за рахунок впровадження системи накопичення.

Далі, із застосуванням цього підходу, розглянуто визначення раціональної потужності та енергоємності бортового СНЕ для конкретних заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації.

Перший етап. Як дослідну обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Рухомий склад представляє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні (див. рис. 2.1). Дослідження виконано для експлуатації поїзда з системами рекуперації за типових штатних умов протягом доби.

Другий етап (виконання тягових розрахунків) аналогічний тому, що наведений у розділі 3.4. Алгоритм виконання тягових розрахунків наведено на рис. 3.11. Тягові розрахунки виконуються за формулами (3.13)–(3.18).

Результати тягових розрахунків, виконаних за формулами (3.13)–(3.18), представлено в табл. 3.10. За результатами тягових розрахунків для заданих умов встановлено, що маса системи накопичення для обраного типу поїзда не повинна перевищувати 7,86 т.

Третій етап. Типові режими ведення рухомого складу метрополітену з системами рекуперації отримано експериментальним шляхом під час його руху за «непікового» та «пікового» графіків на заданих ділянках колії. При цьому, кількість проїздів для кожного перегону та графіку руху становила не менше ніж 20 разів ($n \geq 20$). Отримані дані було піддано обробці статистичними методами. Результати обробки даних, отриманих під час експлуатації рухомого складу на перегоні «Хрещатик–Театральна», наведено на рис. 4.6.

Аналогічним чином було визначено середньостатистичні керуючі впливи на інших ділянках колії (перегонах).

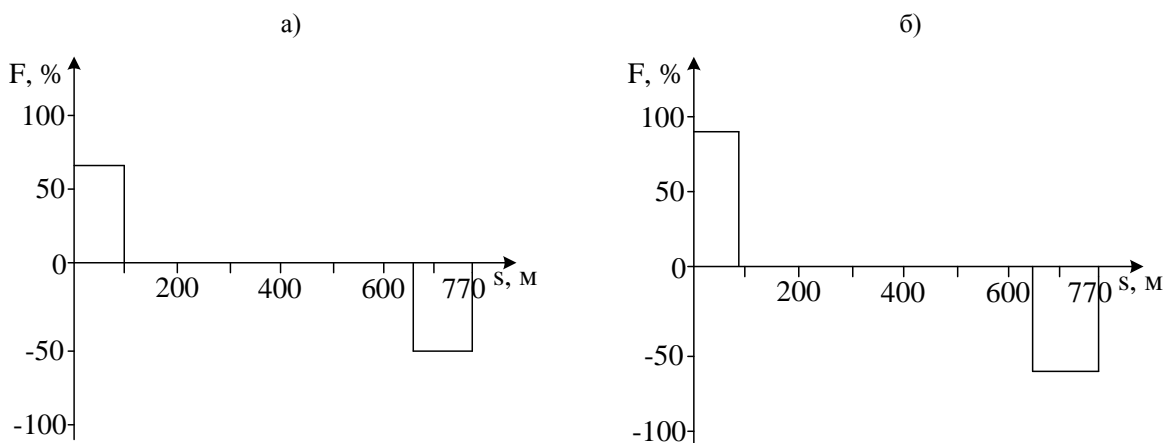
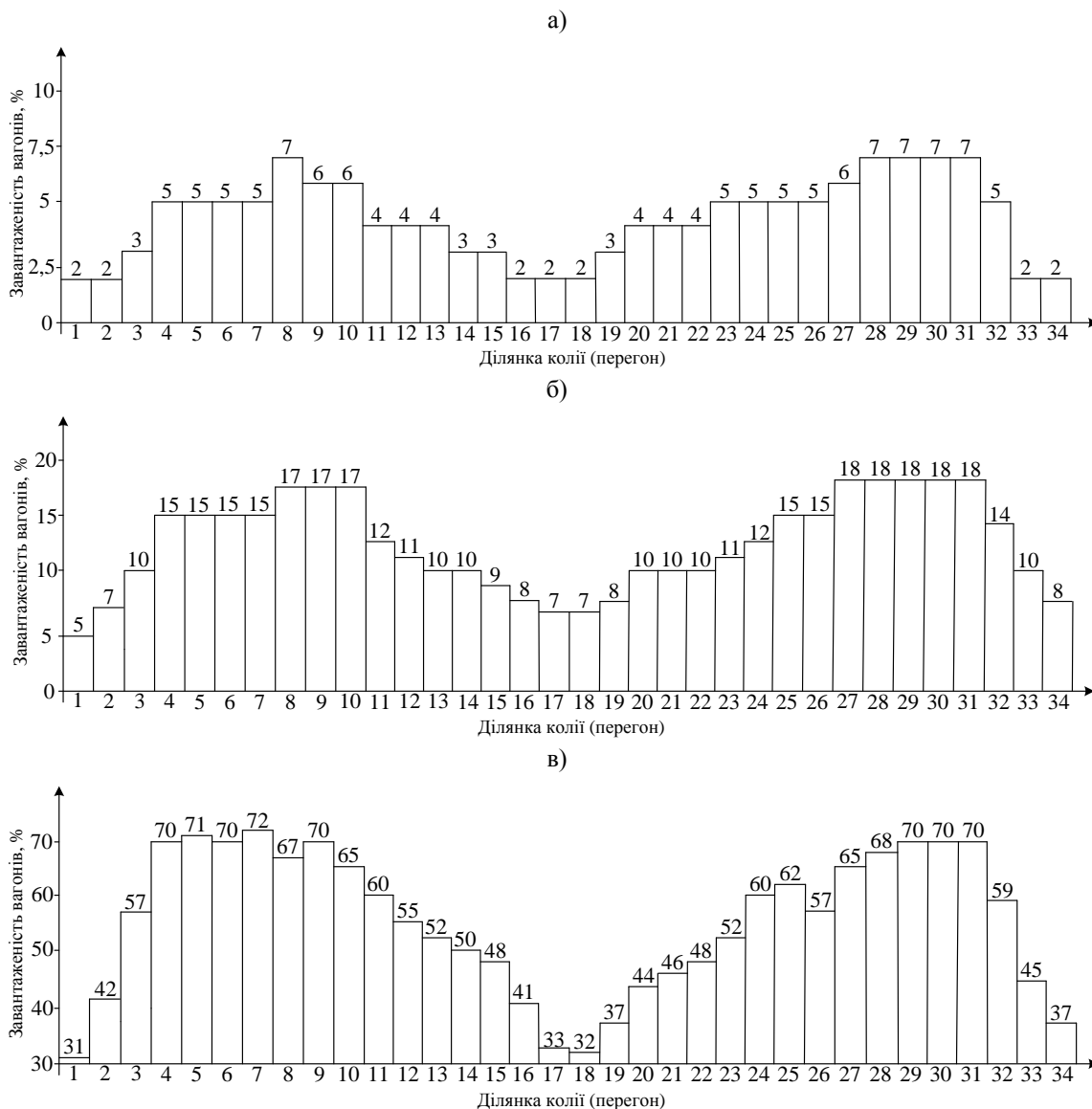


Рис. 4.6 – Результати обробки даних при визначенні типових керуючих впливів на перегоні «Хрещатик–Театральна» під час «непікового» (а) та «пікового» (б) графіків руху

Завантаженість рухомого складу протягом доби у робочі та вихідні дні під час його «пікового» і «непікового» графіків руху залежно від перегону, зображено на рис. 4.7–4.9.



г)

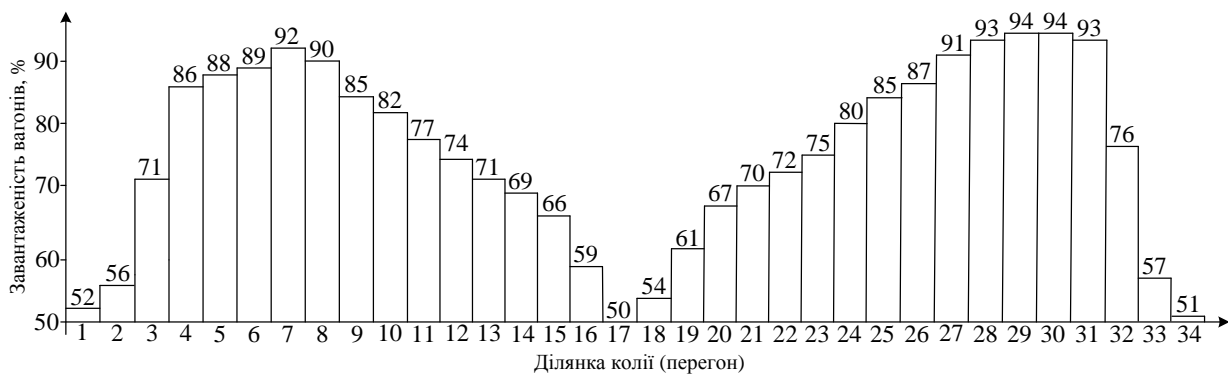


Рис. 4.7 – Завантаженість поїзда протягом доби у робочий день під час його експлуатації за «непіковим» графіком: а) 5³⁰–7⁰⁰; 21⁰⁰–23³⁰; б) 7⁰⁰–8⁰⁰; 20⁰⁰–21⁰⁰; в) 10⁰⁰–18⁰⁰; г) 9⁰⁰–10⁰⁰; 19⁰⁰–20⁰⁰

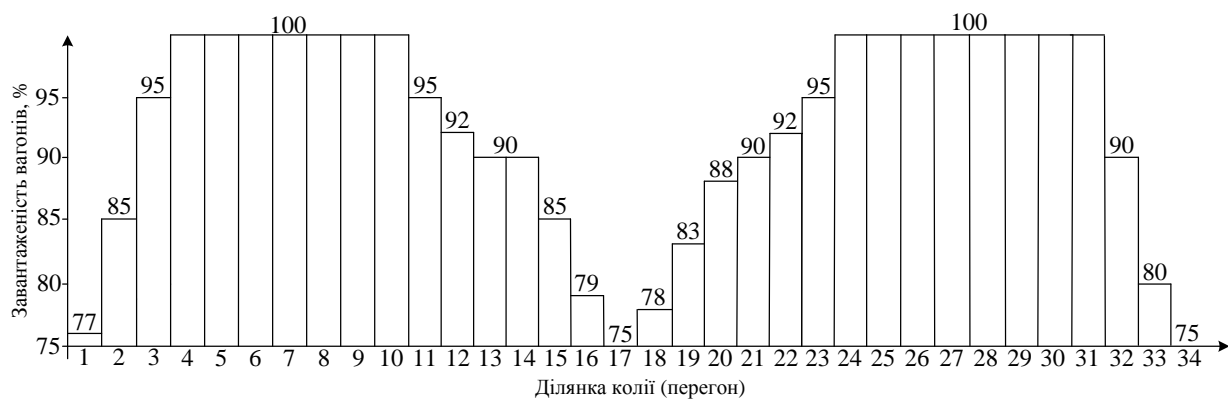
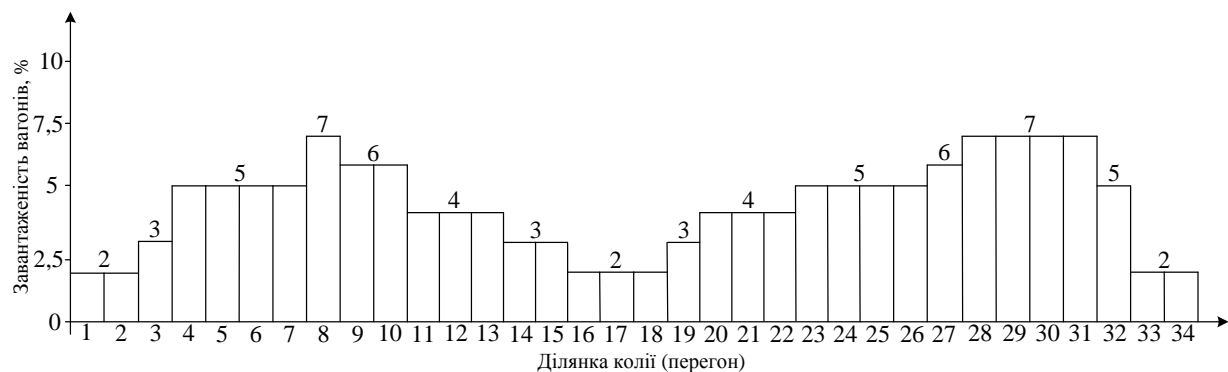
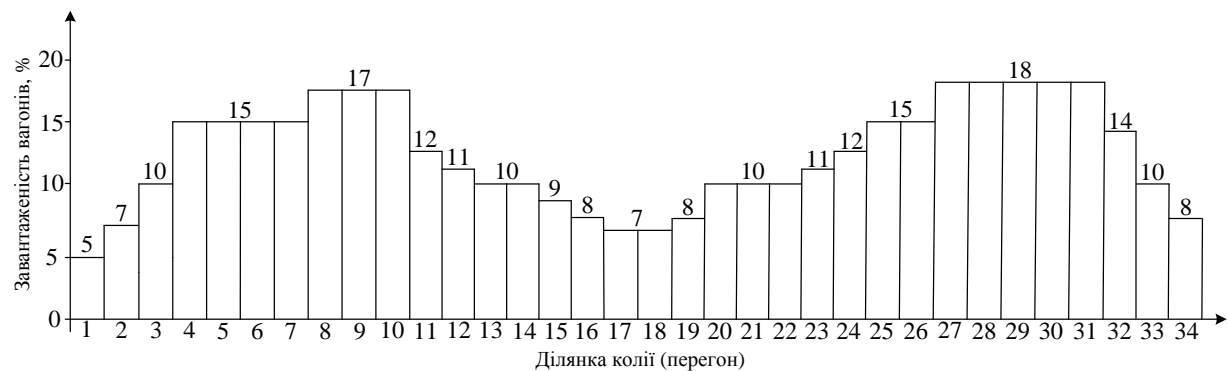


Рис. 4.8 – Завантаженість поїзда протягом доби у робочий день під час його експлуатації за «піковим» графіком (8⁰⁰–9⁰⁰; 17⁰⁰–18⁰⁰)

а)



б)



в)

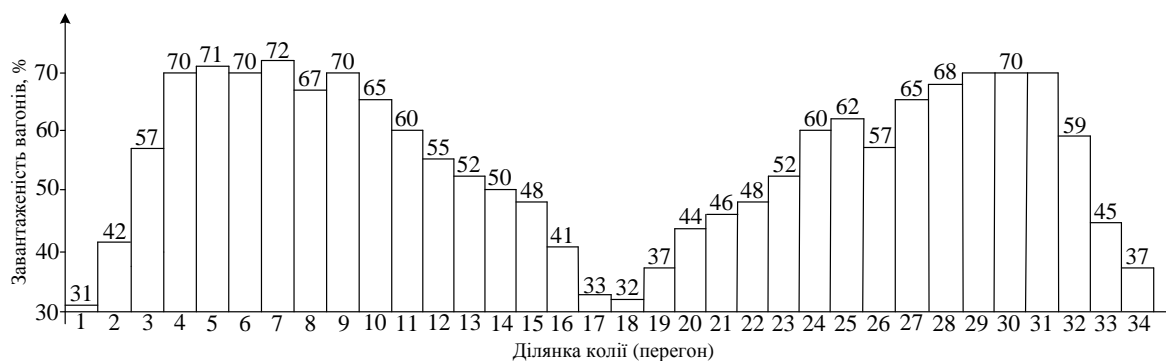


Рис. 4.9 – Завантаженість поїзда протягом доби у вихідний день під час його експлуатації за «непіковим» графіком: а) $5^{30}-8^{00}$; $22^{00}-23^{30}$; б) $8^{00}-9^{00}$; $21^{00}-22^{00}$; в) $9^{00}-21^{00}$

На рис. 4.7–4.9 прийнято наступні позначення перегонів: Лісова-Чернігівська (1); Чернігівська-Дарниця (2); Дарниця-Лівобережна (3); Лівобережна-Гідропарк (4); Гідропарк-Дніпро (5); Дніпро-Арсенальна (6); Арсенальна-Хрещатик (7); Хрещатик-Театральна (8); Театральна-Університет (9); Університет-Вокзальна (10); Вокзальна-Політехнічний інститут (11); Політехнічний інститут-Шулявська (12); Шулявська-Берестейська (13); Берестейська-Нивки (14); Нивки-Святошин (15); Святошин-Житомирська (16); Житомирська-Академмістечко (17); Академмістечко-Житомирська (18); Житомирська-Святошин (19); Святошин-Нивки (20); Нивки-Берестейська (21); Берестейська-Шулявська (22); Шулявська-Політехнічний інститут (23); Політехнічний інститут-Вокзальна (24); Вокзальна-Університет (25); Університет-Театральна (26); Театральна-Хрещатик (27); Хрещатик-Арсенальна (28); Арсенальна-Дніпро (29); Дніпро-Гідропарк (30); Гідропарк-Лівобережна (31); Лівобережна-Дарниця (32); Дарниця-Чернігівська (33); Чернігівська-Лісова (34).

Дослідження (моніторинг) завантаженості рухомого складу виконано фахівцями КП «Київський метрополітен» під час штатних умов його експлуатації у період з 24 по 30 листопада 2019 року на Святошинсько-Броварській лінії.

Прийнято, що поїзд експлуатується наступним чином:

– у робочі дні (5 днів на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіку руху (2 кола з мінімальним завантаженням (рис. 4.7, а); 1 коло – завантаження (рис. 4.7, б); 2 кола – завантаження (рис. 4.7, в); 2 кола – завантаження (рис. 4.7, г)) та два повних кола з дотриманням «пікового» графіку (рис. 4.8);

– у вихідні дні (2 дні на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіку (1 коло з мінімальним завантаженням (рис. 4.9, а); 1 коло – завантаження (рис. 4.9, б); 5 кіл – завантаження (рис. 4.9, в);

– протягом року поїзд експлуатується 315 днів, з яких 225 робочих і 90 вихідних.

Четвертий етап передбачає моделювання руху складу метрополітену. З використанням розробленого і атестованого ПЗ «Motion Simulation» виконано моделювання динамічних та енергетичних процесів під час експлуатації поїзда метрополітену за штатних заданих умов. Вхідні дані, показники динамічних та енергетичних процесів, а також результуючі вихідні показники, які визначаються під час моделювання, формули розрахунків цих показників, більш детально розглянуто в попередньому підрозділі і описано в роботі [218]. Слід лиш зазначити, що результуючим є визначення таких показників як: кількість витраченої електроенергії на тягу ($A_{\text{тяги}}$), кількість електроенергії, що генерується поїздом під час рекуперативного гальмування ($A_{\text{рек}}$), максимальна потужність в режимі рекуперативного гальмування (P_{max}).

Графіки залежностей швидкості від пройденої відстані та швидкості від часу, отримані за результатами математичного моделювання під час «пікового» графіку руху на ділянці «Політехнічний інститут – Шулявська», зображено на рис. 4.10 і рис. 4.11 відповідно.

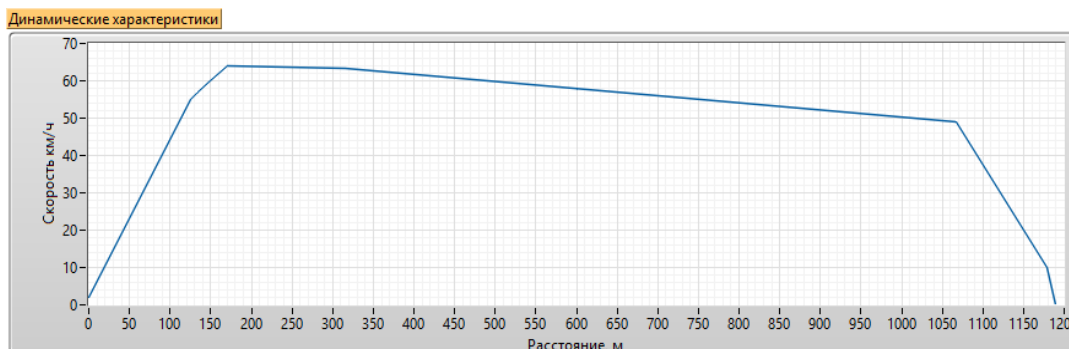


Рис. 4.10 – Графік залежності швидкості від пройденої відстані

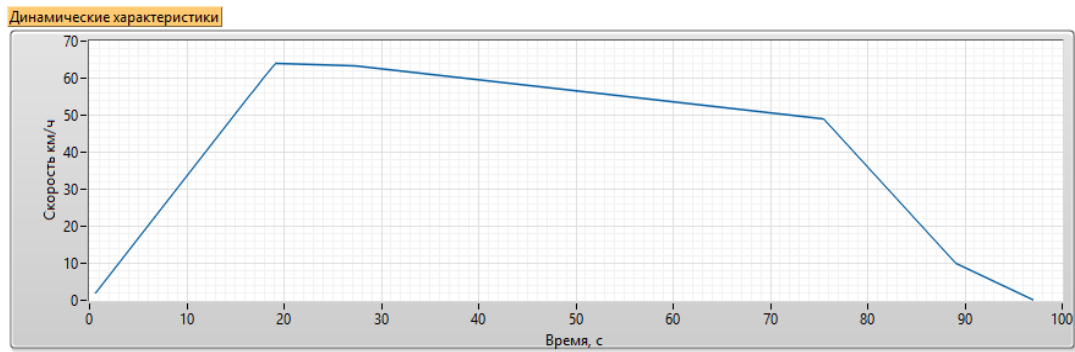


Рис. 4.11 – Графік залежності швидкості від часу

Також було отримано графіки енергетичних процесів. Аналогічним чином було виконано моделювання та отримано графіки для інших умов руху (ділянок, завантажень поїзда, графіку руху тощо).

На *n'ятому етапі* виконується обробка даних математичного моделювання. Обробку даних здійснено з використанням ПЗ «Motion Simulation». Результати обробки даних представлено в табл. 4.5–4.6.

Таблиця 4.5. Результати обробки даних під час руху поїзда у робочий день

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4.7, а) / завантаження поїзда (рис. 4.7, б) / завантаження поїзда (рис. 4.7, в) / завантаження поїзда (рис. 4.7, г) / «піковий» графік руху за умов максимального завантаження (рис. 4.8)		
	A _{тяги} , кВт·год	A _{рек} , кВт·год	P _{max} , МВт
Лісова–Чернігівська	8,05/8,27/8,79/9,07/13,44	2,84/3,11/4,76/5,05/8,96	2,14/2,54/1,8/2,47/3,88
Чернігівська–Дарниця	8,78/9,02/9,78/10,8/15,63	2,12/2,35/2,63/3,37/6,75	1,12/1,24/2,09/2,12/2,43
Дарниця–Лівобережна	7,92/8,03/10,85/12,47/14,03	2,41/2,84/3,03/2,36/6,42	1,15/1,42/1,54/1,66/2,44
Лівобережна–Гідропарк	7,41/8,3/10,54/12,53/16,47	3,1/3,5/4,18/5,06/9,74	1,66/1,73/2,58/2,46/2,72
Гідропарк–Дніпро	13,55/15,58/19,77/22,31/23,74	2,2/2,41/4,29/4,59/8,34	1,21/1,36/2,22/2,1/2,49
Дніпро–Арсенальна	3,73/3,54/3,43/4,06/2,83	8,13/7,98/8,87/9,14/8,36	1,32/1,25/2,22/2,49/2,1
Арсенальна–Хрещатик	7,78/8,75/12,03/12,4/15,45	3,11/3,34/4,63/4,69/5,9	0,99/1,17/1,94/1,56/2,31
Хрещатик–Театральна	5,97/6,05/7,78/7,59/8,02	1,96/2,02/4,07/3,76/4,25	0,92/1,01/1,33/1,28/1,74
Театральна–Університет	5,91/6,13/7,49/8,67/12,43	2,25/3,02/3,41/3,63/5,25	0,87/1,18/1,18/2,03/2,73
Університет–Вокзальна	6,22/6,15/8,04/9,15/12,07	1,82/1,8/2,78/3,41/4,85	0,51/0,65/1,01/1,74/3,06
Вокзальна–Політехнічний інститут	10,52/10,74/13,94/16,99/17,51	2,85/2,91/3,74/4,68/4,86	1,13/1,2/1,8/2,31/2,19
Політехнічний інститут–Шулявська	9,74/10,05/11,08/12,36/15,88	3,3/3,53/4,29/3,95/5,98	1,11/1,45/1,26/2,06/2,66
Шулявська–Берестейська	52,39/53,99/64,76/79,97/81,8	3,45/3,47/3,22/4,13/4,48	1,18/1,38/1,17/1,9/1,67
Берестейська–Нивки	8,84/9,02/11,07/13,22/18,81	3,18/3,27/6,65/8,01/9,64	1,76/2,15/2,56/3,07/3,71
Нивки–Святошин	9,17/9,3/11,23/13,65/13,15	2,44/3,36/3,49/3,62/3,66	0,66/1,78/1,07/2,48/1,75
Святошин–Житомирська	6,04/6,24/6,75/7,04/9,0	8,67/8,69/9,01/9,13/10,47	2,2/2,18/2,85/2,8/3,44
Житомирська–Академістечко	2,15/2,3/2,63/2,88/4,57	2,01/2,11/2,44/3,1/4,05	0,88/0,91/1,0/1,1/1,77
Академістечко–Житомирська	15,05/16,34/18,31/20,6/24,72	3,49/3,57/4,01/4,66/7,05	1,5/1,68/1,85/2,02/3,05
Житомирська–Святошин	14,61/15,09/17,22/23,59/24,85	2,78/2,86/3,47/3,71/3,85	0,91/0,86/1,22/1,26/1,84
Святошин–Нивки	6,29/5,84/6,31/7,39/12,92	4,32/4,13/4,36/5,94/9,06	2,05/2,17/3,11/2,56/3,04
Нивки–Берестейська	11,04/11,43/12,41/13,39/16,69	5,21/5,29/5,89/6,48/8,12	1,69/1,72/2,33/2,94/2,9
Берестейська–Шулявська	4,91/5,23/4,8/5,14/5,21	23,27/23,48/30,05/45,09/44,96	1,79/2,14/2,76/3,34/3,83
Шулявська–Політехнічний інститут	7,49/8,51/9,28/12,9/17,82	3,43/3,86/5,18/7,32/10,12	1,72/1,86/2,46/2,93/3,38
Політехнічний інститут–Вокзальна	11,03/11,51/13,74/15,04/15,53	1,84/2,27/3,72/5,2/5,67	0,85/0,77/1,29/1,27/1,32
Вокзальна–Університет	6,75/6,99/8,04/8,15/10,45	1,76/1,96/2,4/2,53/4,02	0,65/0,72/0,78/0,91/1,82
Університет–Театральна	6,22/6,37/7,94/8,68/10,74	1,75/1,61/2,7/3,21/4,1	0,5/0,61/0,81/0,99/1,4
Театральна–Хрещатик	6,3/6,71/8,13/11,44/13,67	0,95/1,1/2,14/4,14/5,65	0,55/0,78/0,65/1,44/1,92
Хрещатик–Арсенальна	10,08/11,5/12,86/13,73/13,88	2,15/2,78/3,36/4,41/4,12	1,7/1,83/1,9/1,81/1,57
Арсенальна–Дніпро	15,75/16,36/22,46/22,79/23,09	4,39/4,52/3,38/4,34/4,57	1,85/2,48/1,63/1,4/2,21
Дніпро–Гідропарк	9,45/10,49/13,1/13,6/15,84	9,1/9,87/11,43/11,83/13,69	2,23/2,75/2,76/2,17/3,11
Гідропарк–Лівобережна	12,4/12,6/13,11/15,08/17,75	2,54/2,78/3,2/4,66/5,94	1,3/0,84/0,95/1,99/1,96
Лівобережна–Дарниця	8,75/9,22/9,96/10,2/12,65	4,8/5,03/5,46/5,56/7,22	1,64/1,39/2,4/1,82/1,85
Дарниця–Чернігівська	10,17/10,66/11,34/11,52/12,67	5,16/5,34/5,9/6,15/7,08	1,79/2,6/2,08/2,2/1,11
Чернігівська–Лісова	9,88/10,34/11,8/13,4/15,69	1,76/2,44/3,29/3,06/6,24	1,00/1,38/1,08/1,51/3,02

Таблиця 4.6. Результати обробки даних під час руху поїзда у вихідний день

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4.9, а) / завантаження поїзда (рис. 4.9, б) / завантаження поїзда (рис. 4.9, в)		
	$A_{\text{згн}}$, кВт·год	$A_{\text{рек}}$, кВт·год	P_{max} , МВт
Лісова–Чернігівська	8,05/8,27/8,79	2,84/3,11/4,76	2,14/2,54/1,8
Чернігівська–Дарниця	8,78/9,02/9,78	2,12/2,35/2,63	1,12/1,24/2,09
Дарниця–Лівобережна	7,92/8,03/10,85	2,41/2,84/3,03	1,15/1,42/1,54
Лівобережна–Гідропарк	7,41/8,3/10,54	3,1/3,5/4,18	1,66/1,73/2,58
Гідропарк–Дніпро	13,55/15,58/19,77	2,2/2,41/4,29	1,21/1,36/2,22
Дніпро–Арсенальна	3,73/3,54/3,43	8,13/7,98/8,87	1,32/1,25/2,22
Арсенальна–Хрещатик	7,78/8,75/12,03	3,11/3,34/4,63	0,99/1,17/1,94
Хрещатик–Театральна	5,97/6,05/7,78	1,96/2,02/4,07	0,92/1,01/1,33
Театральна–Університет	5,91/6,13/7,49	2,25/3,02/3,41	0,87/1,18/1,18
Університет–Вокзальна	6,22/6,15/8,04	1,82/1,8/2,78	0,51/0,65/1,01
Вокзальна–Політехнічний інститут	10,52/10,74/13,94	2,85/2,91/3,74	1,13/1,2/1,8
Політехнічний інститут–Шулявська	9,74/10,05/11,08	3,3/3,53/4,29	1,11/1,45/1,26
Шулявська–Берестейська	52,39/53,99/64,76	3,45/3,47/3,22	1,18/1,38/1,17
Берестейська–Нивки	8,84/9,02/11,07	3,18/3,27/6,65	1,76/2,15/2,56
Нивки–Святошин	9,17/9,3/11,23	2,44/3,36/3,49	0,66/1,78/1,07
Святошин–Житомирська	6,04/6,24/6,75	8,67/8,69/9,01	2,2/2,18/2,85
Житомирська–Академмістечко	2,15/2,3/2,63	2,01/2,11/2,44	0,88/0,91/1,0
Академмістечко–Житомирська	15,05/16,34/18,31	3,49/3,57/4,01	1,5/1,68/1,85
Житомирська–Святошин	14,61/15,09/17,22	2,78/2,86/3,47	0,91/0,86/1,22
Святошин–Нивки	6,29/5,84/6,31	4,32/4,13/4,36	2,05/2,17/3,11
Нивки–Берестейська	11,04/11,43/12,41	5,21/5,29/5,89	1,69/1,72/2,33
Берестейська–Шулявська	4,91/5,23/4,8	23,27/23,48/30,05	1,79/2,14/2,76
Шулявська–КПІ	7,49/8,51/9,28	3,43/3,86/5,18	1,72/1,86/2,46
КПІ–Вокзальна	11,03/11,51/13,74	1,84/2,27/3,72	0,85/0,77/1,29
Вокзальна–Університет	6,75/6,99/8,04	1,76/1,96/2,4	0,65/0,72/0,78
Університет–Театральна	6,22/6,37/7,94	1,75/1,61/2,7	0,5/0,61/0,81
Театральна–Хрещатик	6,3/6,71/8,13	0,95/1,1/2,14	0,55/0,78/0,65
Хрещатик–Арсенальна	10,08/11,5/12,86	2,15/2,78/3,36	1,7/1,83/1,9
Арсенальна–Дніпро	15,75/16,36/22,46	4,39/4,52/3,38	1,85/2,48/1,63
Дніпро–Гідропарк	9,45/10,49/13,1	9,1/9,87/11,43	2,23/2,75/2,76
Гідропарк–Лівобережна	12,4/12,6/13,11	2,54/2,78/3,2	1,3/0,84/0,95
Лівобережна–Дарниця	8,75/9,22/9,96	4,8/5,03/5,46	1,64/1,39/2,4
Дарниця–Чернігівська	10,17/10,66/11,34	5,16/5,34/5,9	1,79/2,6/2,08
Чернігівська–Лісова	9,88/10,34/11,8	1,76/2,44/3,29	1,00/1,38/1,08

За результатами обробки даних математичного моделювання (табл. 4.5-4.6) зрозуміло, що значення максимальної потужності та кількості електроенергії під час рекуперативного гальмування складають 3,88 МВт та 45,09 кВт·год відповідно. Отже, встановлено перші граничні значення параметрів бортового ЄНЕ за результатами аналізу отриманих даних: $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 45,09]$. Інші граничні значення потужності та енергоємності визначаються з урахуванням обмежень за масою та залежать від обраних типів ЄНЕ.

На *шостому етапі* обираються параметри бортових ЄНЕ (потужність та енергоємність). В нашому випадку область граничних значень потужності та енергоємності бортових ЄНЕ визначено за умов застосування систем накопичення, зібраних на базі конденсаторних модулів таких відомих виробників як ЕКОНД (Росія), Nesscap (Корея), Maxwell (США), Epcos (Німеччина). Загальний вигляд обраних конденсаторних модулів зображено на рис. 4.12, їх технічні характеристики, представлено в табл. 4.7.



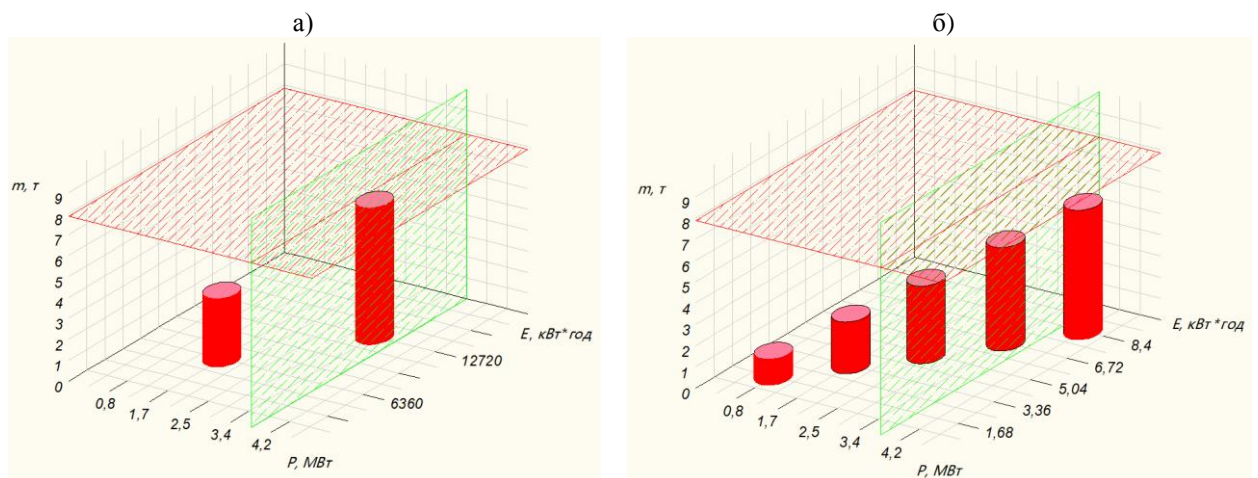


Рис. 4.12 – Загальний вигляд конденсаторних модулів 10EK303 (а), 30EK404 (б), ESHSR-3000C0-002R7A5 (в), BMOD0063P125 B08 (г), BMOD0165P048 B01 (д), B49300 L1276 Q (е)

Таблиця 4.7. Технічні характеристики обраних конденсаторних модулів

Назва показника	Тип конденсаторного модуля					
	10EK303	30EK404	ESHSR-3000C0-002R7A5	BMOD0063 P125 B08	BMOD0165 P048 BXX	B49300 L1276 Q
Робоча напруга, В	15-7,5	45-22,5	2,7-1,08	136-68	51-25,5	2,7-1,35
Ємність, Ф	4500	400	3000	63	200	2700
Внутрішній опір, мОм	20	12	0,3	18	6,3	0,6
Маса, кг	34	38	0,53	61	13,5	0,73
Загальна (максимальна) кількість енергії, яку здатний запасати накопичувач, кДж	506	378	12,2	703	260	8,8
Кількість енергії, що запасється в діапазоні робочої напруги, кДж	380	303	10,4	583	215	7,2
Габаритні розміри, мм	512x181x251	560x219x245	D60x144	619x33x265	418x194x179	167x61x61
Максимальна потужність, кВт	28	42	3,3	220	92	2,2
Робоча температура, °С	-50...+70	-50...+60	-40...+65	-40...+65	-40...+65	-30...+70

Системи накопичення з бортовими ЄНЕ необхідного значення робочої напруги, потужності та енергоємності було сформовано шляхом послідовно-паралельного з'єднання зазначених конденсаторних модулів. Маси систем накопичення визначено шляхом сумування мас конденсаторних модулів (бортового ЄНЕ), керованих перетворювачів, металоконструкцій, з'єднувальних проводів (шин), датчиків струму та напруги, елементів систем охолодження і систем керування та інших додаткових матеріалів. Для систем накопичення з обраних конденсаторних модулів побудовано графіки залежностей маси від потужності та маси від енергоємності, які зображено на рис. 4.13.



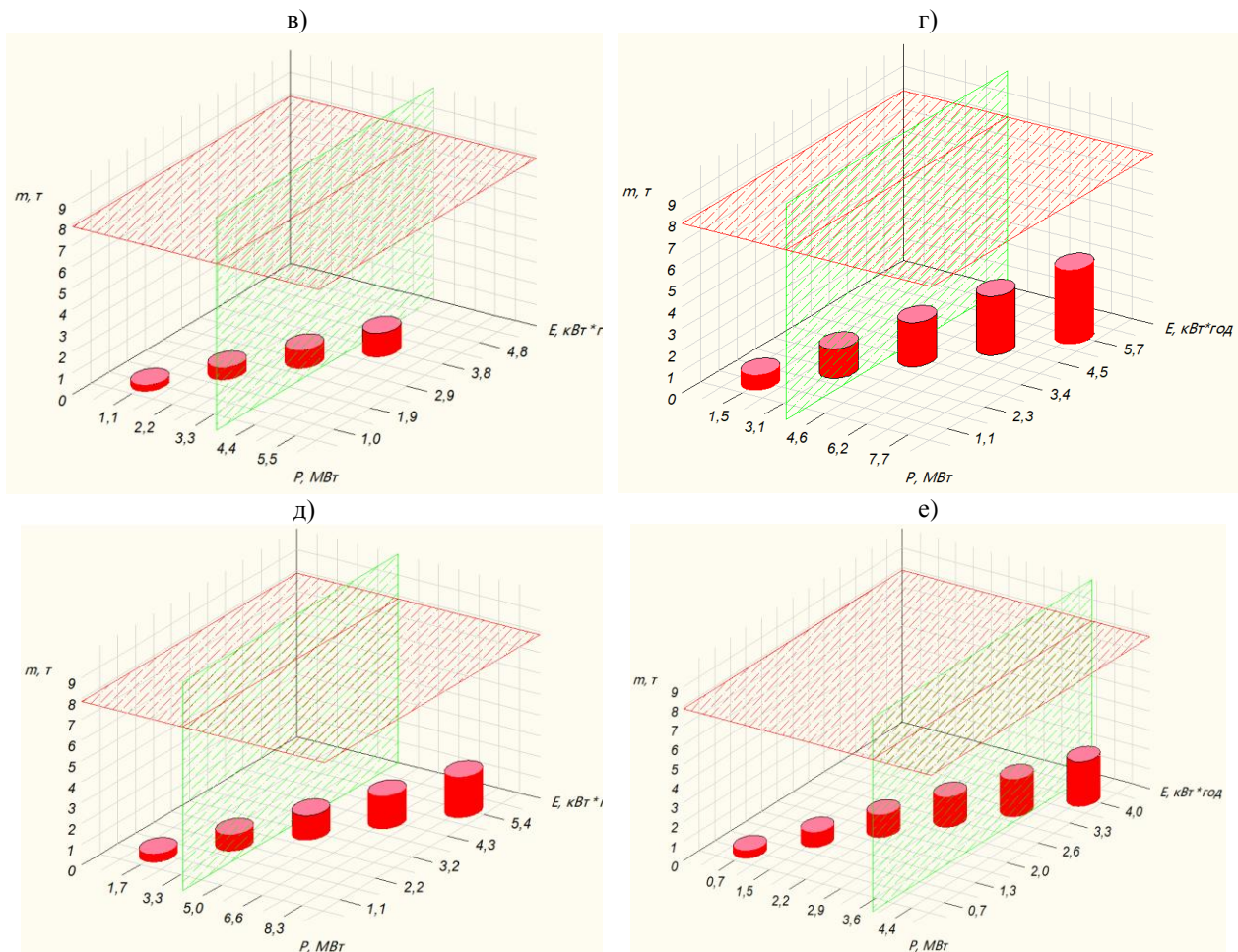


Рис. 4.13 – Графіки залежності маси від потужності та енергоємності систем накопичення, зібраних з конденсаторних модулів типу: 10ЕК303 (а); 30ЕК404 (б); ESHSR-3000C0-002R7A5 (в); BMOD0063P125 B08 (г); BMOD0165 P048 BXX (д); B49300 L1276 Q (е)

За результатом аналізу графіків (рис. 4.13) визначено граничні значення та області можливих значень потужності та енергоємності з урахуванням обмежень за масою. Зокрема, для систем накопичення з робочою напругою (450-900) В, зібраних з конденсаторних модулів типу 10ЕК303, максимально допустиме значення потужності і енергоємності не має перевищувати відповідно 4,04 МВт і 15,3 кВт·год; з модулів типу 30ЕК404 – 5,43 МВт і 10,9 кВт·год; з модулів типу ESHSR-3000C0-002R7A5 – 30,6 МВт і 26,9 кВт·год; з модулів типу BMOD0063P125 B08 – 17,7 МВт і 13,0 кВт·год; з модулів типу BMOD0165P048 BXX – 33,5 МВт і 21,7 кВт·год; з модулів типу B49300L1276Q – 14,8 МВт і 13,5 кВт·год. Отже, встановлено другі граничні значення параметрів бортового ЄНЕ з урахуванням обмежень за масою.

З урахуванням визначених обмежень за масою та на підставі обробки даних математичного моделювання встановлено такі граничні значення параметрів:

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу 10ЕК303 – $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 15,3]$;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу 30ЕК404 – $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 10,9]$;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу ESHSR-3000C0-002R7A5 – $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 26,9]$;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу BMOD0063P125 B08 – $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 13,0]$;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу BMOD0165P048 BXX – $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 21,7]$;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу B49300L1276Q – $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots 13,5]$.

Виходячи із отриманих граничних значень параметрів бортових ЄНЕ, для подальших розрахунків залежно від типу конденсаторних модулів обрано бортові ЄНЕ з рівнем потужності та робочою енергоємності, які наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8. – Обрані параметри бортових ємнісних накопичувачів енергії

Тип конденсаторного модуля	Потужність, МВт	Енергоємність, кВт·год
10ЕК303	1,7; 3,4	6,4; 12,7
30ЕК404	0,8; 1,7; 2,5; 3,4	1,7; 3,4; 5,0; 6,7
ESHSR-3000C0-002R7A5	1,1; 2,2; 3,3	1,0; 1,9; 2,9
BMOD0063P125 B08	1,5; 3,1	1,1; 2,2
BMOD0165P048 BXX	1,7; 3,3	1,1; 2,2
B49300L1276Q	0,7; 1,5; 2,2; 2,9; 3,6	0,7; 1,3; 2,0; 2,6; 3,3

В даному випадку загальна кількість обраних систем накопичення з різним рівнем потужності і енергоємності бортових ЄНЕ, які задовольняють умовам (визначеними обмеженнями), складає 18.

Сьомий етап. Оцінка вартості систем накопичення здійснюється за результатами техніко-економічного аналізу вартості обраних бортових ЄНЕ, реверсивних перетворювачів та іншого комплектувального обладнання від фірм-виробників даної продукції.

Виконаний техніко-економічний аналіз дозволив встановити, що основними складовими вартості систем накопичення є власне бортовий ЄНЕ та реверсивний перетворювач. При цьому питома вартість обраних систем накопичення залежно від їх параметрів та типу застосованих конденсаторних модулів складає від 1,1 млн. грн. до 3,9 млн. грн. за 1 т.

Восьмий етап полягає у дослідженні кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення. Процедура досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії за цим етапом є аналогічною щодо виконання етапу сім одного з попередніх підходів (див. стор. 45, 46), тому зупиняться на ній детально не має необхідності.

Під час досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії прийнято наступні припущення: перед проведенням розрахунків накопичувач повністю розряджений, ККД накопичувача складає 0,98 ($\eta_{\text{ЄНЕ}}=0,98$), ККД реверсивного перетворювача – 0,96 ($\eta_{\text{РП}}=0,96$), ККД тягового двигуна – 0,94 ($\eta_{\text{ТД}}=0,94$), ККД редуктора – 0,98 ($\eta_{\text{РЕД}}=0,98$).

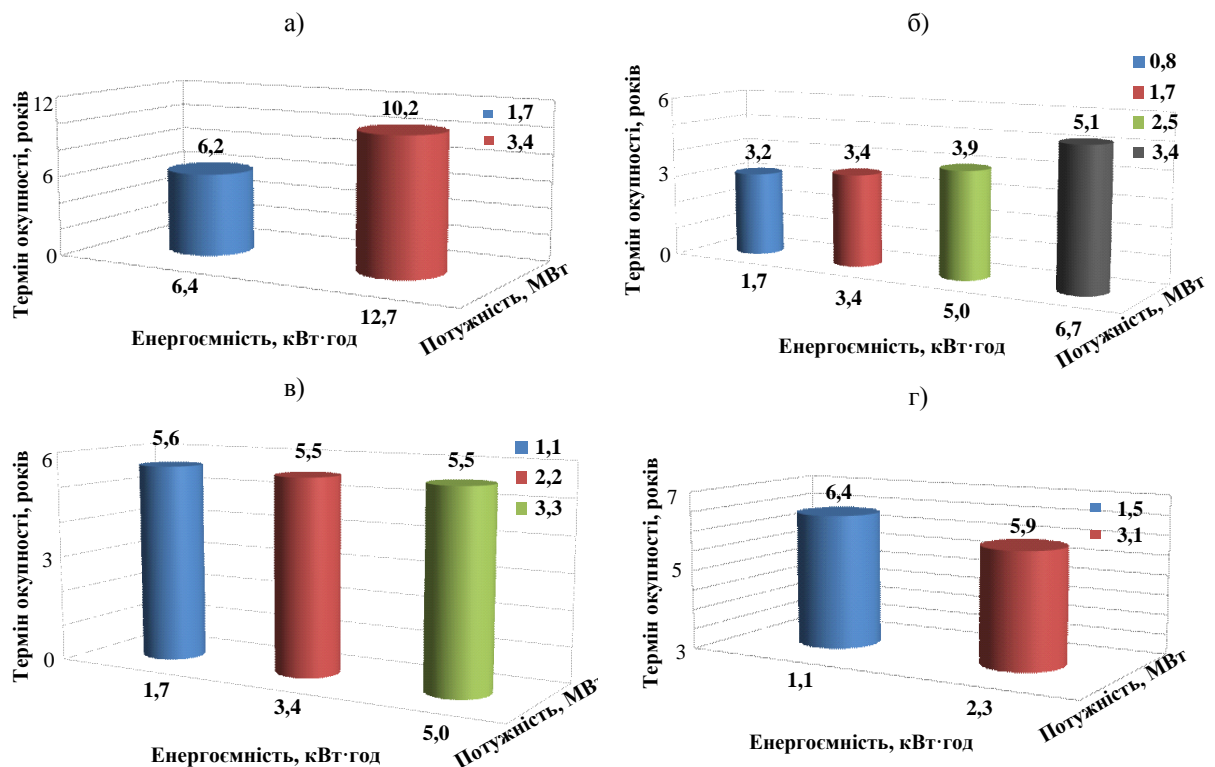
Спрощений алгоритм виконання цих досліджень показано на рис. 3.9.

З використанням вищезазначеного алгоритму (рис. 3.9) та формул (3.7)–(3.10) визначено величини кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення.

Дев'ятий етап передбачає побудову характеристик (діаграм) терміну окупності систем накопичення залежно від робочої потужності та від енергоємності обраних бортових ЄНЕ.

Величина терміну окупності визначається за відношенням вартості від впровадження системи накопичення до вартості заощадженої електроенергії цією системою за рік згідно з формулою (3.11). При цьому $T_e = 2,27$ грн./кВт·год.

Результати розрахунку терміну окупності для обраних систем накопичення зображено у вигляді діаграм на рис. 4.14.



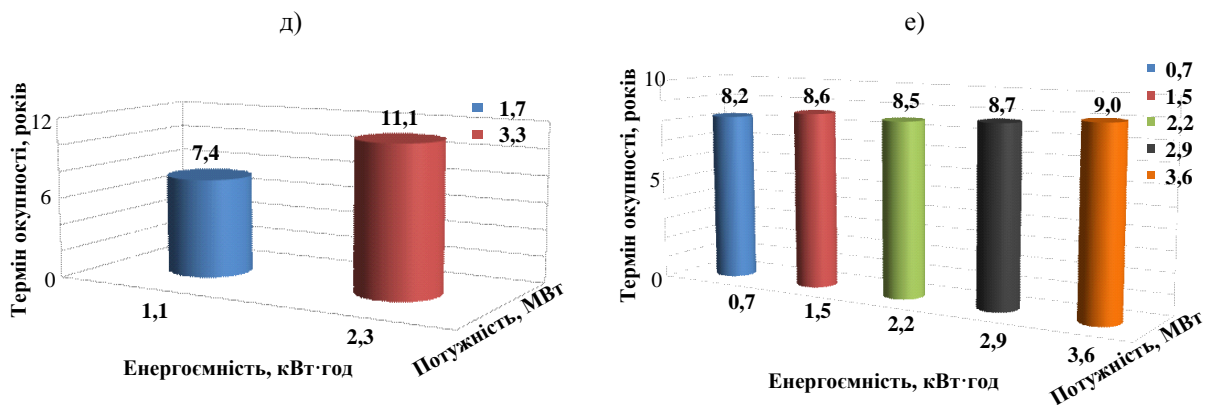


Рис. 4.14 – Діаграми терміну окупності обраних систем накопичення, зібраних з конденсаторних модулів типу 10ЕК303 (а); 30ЕК404 (б); ESHSR-3000C0-002R7A5 (в); BMOD0063P125 B08 (г); BMOD0165 P048BXX (д); B49300 L1276 Q (е)

Десятий етап (визначення системи з раціональними параметрами). За результатами аналізу діаграм терміну окупності обраних систем накопичення зрозуміло, що для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену найбільш раціональною є система з величиною робочої енергоємності 1,7 кВт·год та максимальною потужністю 0,8 МВт, зібрана з конденсаторних модулів типу 30ЕК404 (рис. 4.14). Термін окупності цієї системи – мінімальний і складає 3,2 роки, а маса – близько 1,2 тони.

За умов впровадження системи накопичення з раціональними параметрами розраховано кількість заощадженої електроенергії по відношенню до кількості спожитої електроенергії за формулою (3.12).

За формулою (3.12) визначено, що для заданих умов експлуатації, впровадження системи накопичення з раціональними параметрами бортового ЄНЕ дозволить заощадити 11,4 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу. При цьому маса системи накопичення з раціональними параметрами складає близько 0,5 % та 0,8 % від маси поїзда метрополітену з максимальним завантаженням та в порожньому стані відповідно. За умов встановлення цієї системи накопичення динаміка розгону поїзда зменшиться на 0,5 %.

Таким чином, з використанням запропонованого підходу оцінки параметрів, в основу якого покладено методи теоретичних досліджень, визначено раціональні параметри бортового ЄНЕ (максимальну потужність та робочу енергоємність) для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розвитку теорії з визначення величин раціональної потужності та енергоємності бортових накопичувачів енергії, за якої їх оптимальні енергетичні параметри будуть розраховуватись за результатами визначення раціональних режимів ведення поїздів метрополітену з системами рекуперації на заданих ділянках (перегонах).

4.3 Розробка програмного забезпечення для визначення раціональних режимів ведення рухомого складу метрополітену на перегоні

Одним з перспективних та дієвих заходів вирішення проблеми щодо зменшення споживання електроенергії на тягу та підвищення ефективності використання енергії рекуперативного гальмування рухомого складу, який не потребує значних фінансових витрат, є удосконалення режимів ведення поїздів [2, 168, 220, 221]. В цій роботі запропоновано розробити алгоритмічне та програмне забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену, що дозволить автоматизувати та пришвидшити процес отримання результатів шляхом використання сучасних методів та засобів для вирішення задач раціоналізації та побудови систем керування.

Розроблене алгоритмічне та програмне забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда та керуючих впливів під час заданих умов експлуатації, за яких забезпечується графік руху на перегоні та споживається мінімальна кількість електроенергії з контактної мережі, дозволить мінімізувати споживання електроенергії з контактної мережі та запропонувати концептуально нову теорію з визначення величин раціональної потужності та енергоємності бортових накопичувачів енергії.

В основу створення алгоритмічного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення рухомого складу покладено вирішення багатокритеріальної задачі за методом задоволення вимог (головного критерію). При цьому головним критерієм в нашому випадку є мінімальна кількість споживання електроенергії з контактної мережі. На інші критерії (час руху на перегоні, пройдений шлях та швидкість руху в кінці останнього кроку варіації) накладаються певні задані обмеження. Алгоритмічне забезпечення для визначення раціонального режиму ведення рухомого складу метрополітену включає наступні етапи [222]:

– завдання технічних характеристик рухомого складу;

- завдання профілю колії та швидкісних обмежень на ділянці (перегоні);
- завдання керуючих впливів та кроків варіації;
- підпрограма спрямлення профілю колії;
- побудова швидкісних сіток;
- підпрограма розрахунку кроку варіації;
- визначення режимів ведення, за яких забезпечується заданий пройдений шлях та час руху на перегоні, а швидкість в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю з урахуванням заданих обмежень та допустимих відхилень;
- визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену за головним критерієм.

Для опису динамічних і енергетичних процесів під час заданих можливих умов ведення рухомого складу метрополітену з системами рекуперації використано математичну модель, яка представлена у вигляді системи рівнянь (4.1). В подальшому з використанням рівнянь математичної моделі (4.1) розроблено алгоритмічне забезпечення, яке дозволяє досліджувати динамічні та енергетичні показники під час заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену. В спрощеному вигляді блок-схему алгоритмічного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення складу зображено на рис. 4.15.

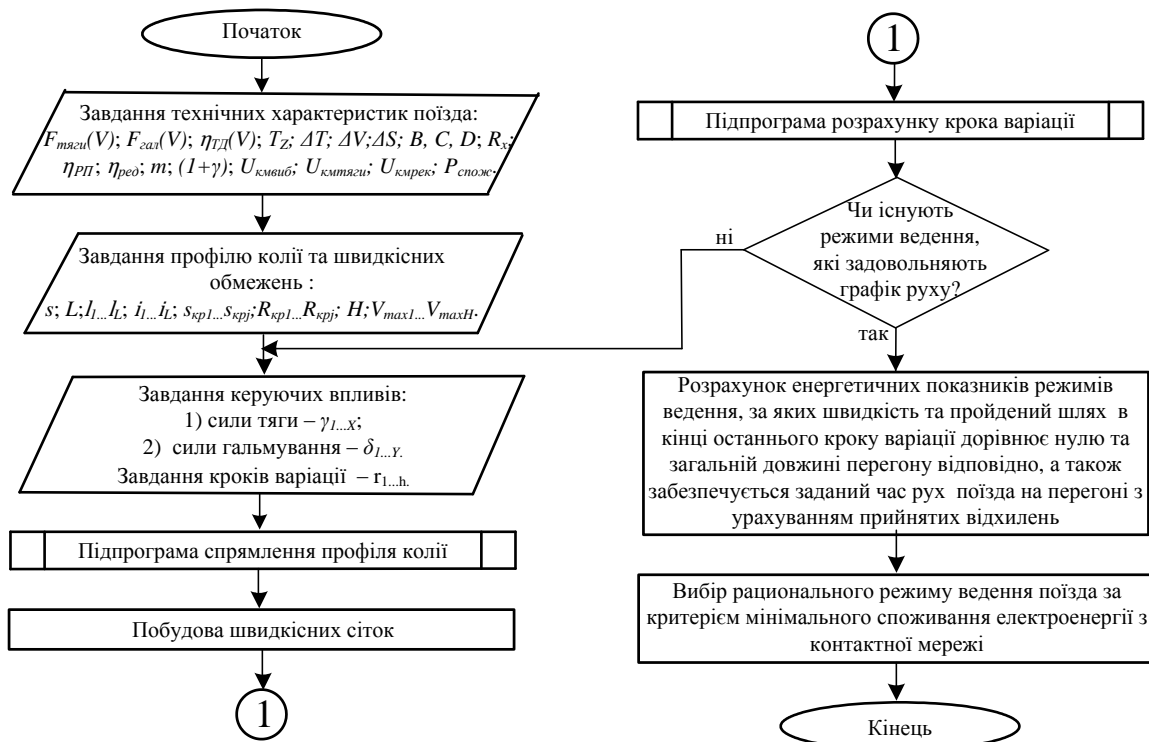


Рис. 4.15 – Блок-схема алгоритмічного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення рухомого складу

Нижче представлено опис кожного з вищезазначених етапів алгоритмічного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення рухомого складу метрополітену.

Перший етап (завдання характеристик поїзда): тягова характеристика – $F_{тяги}(V)$; гальмівна характеристика – $F_{гал}(V)$; характеристика ККД тягового двигуна – $\eta_{ТД}(V)$. Наведені характеристики поїзда задаються у вигляді масивів даних.

Задаються наступні показники: заданий час руху на перегоні – T_Z ; допустиме відхилення часу руху поїзда на перегоні – ΔT ; допустиме відхилення швидкості в кінці останнього кроку варіації – ΔV ; допустиме відхилення відстані в кінці останнього кроку варіації – ΔS ; коефіцієнти – B, C, D, R_x ; ККД реверсивного перетворювача – $\eta_{РП}$; ККД редуктора – $\eta_{ред}$; маса рухомого складу з урахуванням завантаження – m ; коефіцієнт інерції обертових мас – $(1+\gamma)$; напруга контактної мережі в режимі тяги, вибігу та рекуперативного гальмування – $U_{кмтяги}, U_{кмвиб}, U_{кмрек}$; потужність споживання електроенергії на власні потреби – $P_{спож}$.

Другий етап (завдання профілю колії та обмеження швидкості на заданому перегоні): загальна довжина перегону – s ; кількість елементів зі змінним профілем на перегоні – L ; довжина елементів – $l_1 \dots l_L$; ухил елементів – $i_1 \dots i_L$; наявність кривих на елементі – так/ні; довжина кривої (за наявності кривої на елементі) – $s_{кр1} \dots s_{крj}$; радіус кривої (за наявності кривої на елементі) – $R_{кр1} \dots R_{крj}$; кількість ділянок на перегоні з обмеженням швидкості – N ; обмеження швидкості – $V_{max1} \dots V_{maxN}$.

Третій етап (завдання керуючих впливів та кроків варіації): керування силою тяги – $\gamma_{1..X}$, керування силою гальмування – $\delta_{1..Y}$, де X, Y – кількість можливих керуючих впливів під час руху поїзда в режимах тяги та гальмування відповідно; кількість кроків варіації – h , довжина кожного кроку варіації – $r_1 \dots r_h$. Кроки

варіації задаються з урахуванням того, що на кожному кроці профіль колії та швидкість обмеження мають бути постійними величинами.

Четвертий етап (виконання підпрограми спрямлення профілю колії). Принципи спрямлення профілю колії загальновідомі та розкриті в багатьох існуючих роботах [185, 211, 212], тому детально зупинятись на них відсутня необхідність.

П'ятий етап (побудова швидкісної сітки): будується швидкісна сітка у вигляді масивів даних (залежності – $s(V)$, $t(V)$, $a(V)$, $I_{\text{тяги}}(V)$, $I_{\text{рек}}(V)$, $P_{\text{тяги}}(V)$, $P_{\text{рек}}(V)$, $A_{\text{тяги}}(V)$, $A_{\text{рек}}(V)$, $A_{\Sigma}(V)$). Кількість швидкісних сіток залежить від кількості заданих керуючих впливів та кількості спрямлених ділянок колії.

Побудова швидкісної сітки передбачає розрахунки вищезазначених показників за умов зміни швидкості на ΔV в діапазоні від 0 до V_{max} . Швидкісна сітка будується залежно від кроку зміни швидкості ΔV , який задається на першому етапі під час введення характеристик рухомого складу.

Швидкісна сітка будується наступним чином: спочатку будується масив даних зміни швидкості (крок зміни швидкості), потім розраховуються масиви даних пройденого шляху, часу руху, прискорення, спожитого або рекуперованого струму, спожитої або рекуперованої потужності, спожитої або рекуперованої електроенергії, загальної електроенергії за крок зміни швидкості ΔV . Показники споживання визначаються для швидкісних сіток, за яких поїзд рухається в режимі тяги або вибігу, показники рекуперації - відповідно для режимів рекуперативного гальмування. При цьому пройдений шлях, час руху та прискорення за крок зміни швидкості обчислюється методом інтегрування рівняння руху поїзда. Таким чином, пройдений шлях визначається:

– у режимі тяги за формулою (4.31):

$$\Delta s = \int_0^s ds = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'(F_{\text{тяги}} - W_{\text{очн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} V dV; \quad (4.31)$$

– у режимі вибігу за формулою (4.32):

$$\Delta s = \int_0^s ds = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'(-W_{\text{очн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} V dV = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'(W_{\text{очн}} \pm W_i)} \int_{V_2}^{V_1} V dV; \quad (4.32)$$

– у режимі гальмування за формулою (4.33):

$$\Delta s = \int_0^s ds = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta'(F_{\text{гал}} + W_{\text{очн}} \pm W_i)} \int_{V_2}^{V_1} V dV, \quad (4.33)$$

де $\zeta' = 12,96$ – коефіцієнт;

V_1, V_2 – відповідно початкова та кінцева швидкості рухомого складу.

Час руху:

– у режимі тяги за формулою (4.34):

$$\Delta t = \int_0^t dt = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta(F_{\text{тяги}} - W_{\text{очн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} dV; \quad (4.34)$$

– у режимі вибігу за формулою (4.35):

$$\Delta t = \int_0^t dt = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta(-W_{\text{очн}} \pm W_i)} \int_{V_1}^{V_2} dV = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta(W_{\text{очн}} \pm W_i)} \int_{V_2}^{V_1} dV; \quad (4.35)$$

– у режимі гальмування за формулою (4.36):

$$\Delta t = \int_0^t dt = \frac{m(1+\gamma)}{\zeta(F_{\text{торм}} + W_{\text{очн}} \pm W_i)} \int_{V_2}^{V_1} dV, \quad (4.36)$$

де $\zeta = 3,6$ – коефіцієнт.

Прискорення:

– у режимі тяги за формулою (4.37):

$$\Delta a = \frac{dv}{dt} = \frac{(F_{\text{тяги}} - W_{\text{очн}} \pm W_i)}{m(1+\gamma)}; \quad (4.37)$$

– у режимі вибігу за формулою (4.38):

$$\Delta a = \frac{dv}{dt} = \frac{(-W_{\text{очн}} \pm W_i)}{m(1+\gamma)}; \quad (4.38)$$

– у режимі гальмування за формулою (4.39):

$$\Delta a = \frac{dv}{dt} = \frac{(F_{\text{Гал}} + W_{\text{Осн}} \pm W_i)}{m(1 + \gamma)}; \quad (4.39)$$

Струм:

– у режимі тяги за формулою (4.40):

$$\Delta I_{\text{Тяги}} = \frac{F_{\text{Тяги}} \cdot \Delta V}{U_{\text{кмТяги}} \cdot \eta_{\text{РП}} \cdot \eta_{\text{ТД}} \cdot \eta_{\text{ред}}}; \quad (4.40)$$

– у режимі гальмування за формулою (4.41):

$$\Delta I_{\text{Гал}} = \frac{\eta_{\text{РП}} \cdot \eta_{\text{ТД}} \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot F_{\text{Гал}} \cdot \Delta V}{U_{\text{кмГал}}}. \quad (4.41)$$

Потужність:

– у режимі тяги за формулою (4.42):

$$\Delta P_{\text{Тяги}} = \frac{F_{\text{Тяги}} \cdot \Delta V}{3,6}; \quad (4.42)$$

– у режимі гальмування за формулою (4.43):

$$\Delta P_{\text{Гал}} = \frac{F_{\text{Гал}} \cdot \Delta V}{3,6}; \quad (4.43)$$

Кількість електроенергії:

– у режимі тяги за формулою (4.44):

$$\Delta A = \frac{U_{\text{кмТяги}} \cdot \int_0^t I_{\text{Тяги}} dt}{3600 \cdot 1000}, \quad (4.44)$$

– у режимі вибігу за формулою (4.45):

$$\Delta A = \frac{U_{\text{кмВиб}} \cdot \int_0^t I_{\text{Виб}} dt}{3600 \cdot 1000}, \quad (4.45)$$

– у режимі гальмування за формулою (4.46):

$$\Delta A = \frac{U_{\text{кмГал}} \cdot \int_0^t I_{\text{Гал}} dt}{3600 \cdot 1000}. \quad (4.46)$$

Шостий етап (підпрограма розрахунку кроку варіації). Розрахунки розпочинаються з першого кроку варіації. Під час розрахунків першого кроку варіації розглядаються задані керуючі впливи для режиму тяги. В першу чергу, визначається швидкість в кінці першого кроку варіації для різних керуючих впливів. Швидкість в кінці кожного кроку варіації для кожного керуючого впливу визначається за побудованими швидкісними сітками.

Для всіх керуючих впливів перевіряється умова: «чи швидкість в кінці кроку варіації більша за 0 та менша за встановлене обмеження швидкості на ділянці?». Перевірка зазначеної умови виконується на кожному кроці варіації. Якщо існують керуючі впливи, за яких зазначена умова не виконується, то такі керуючі впливи виключають з подальших розрахунків. Якщо на етапі розрахунків кроку варіації не буде знайдено жодного керуючого впливу, який задовольняє вищезазначеним умовам, то розрахунки мають завершитись та з'явиться повідомлення відповідного змісту: «Відсутні керуючі впливи. Необхідно змінити початкові умови розрахунків (змінити кроки варіації, керуючі впливи тощо).

Для тих керуючих впливів, які задовольняють вищезазначеним умовам, з швидкісної сітки обирається час руху, кількість спожитої або рекуперованої електроенергії в кінці кроку варіації.

Після розрахунку кожного керуючого впливу на заданому кроці варіації перевіряється умова: «Для всіх керуючих впливів виконані розрахунки?» У випадку виконання умови підпрограма розрахунку виконується для наступного кроку варіації. В іншому випадку здійснюються розрахунки для наступного керуючого впливу для даного кроку варіації.

Під час зміни кроку варіації виконується перевірка умови «Крок варіації останній?». Якщо умова виконується, тоді здійснюється визначення режимів ведення, за яких швидкість в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю та забезпечується заданий час руху на перегоні з урахуванням прийнятих відхилень. В іншому випадку розрахунки виконуються для наступного кроку варіації.

Сьомий етап (визначення режимів ведення, за яких швидкість в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю та пройдена відстань – загальній довжині перегону, а також забезпечується заданий час руху на перегоні з урахуванням прийнятих відхилень).

У разі відсутності режимів ведення, за яких швидкість в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю та забезпечується заданий час руху з урахуванням прийнятих відхилень, має з'явиться повідомлення

наступного змісту: «Відсутні режими ведення. Необхідно змінити початкові умови розрахунків (змінити кроки варіації, керуючі впливи тощо).

Для обраних режимів ведення, за яких (швидкість в кінці останнього кроку варіації дорівнює нулю, пройдена відстань в кінці останнього кроку варіації дорівнює загальній довжині перегону, а також забезпечується заданий час руху на перегоні з урахуванням прийнятих відхилень) розраховується кількість спожитої електроенергії на тягу, кількість рекуперованої електроенергії в мережу, а також загальна кількість спожитої електроенергії з мережі з урахуванням повернення електроенергії рекуперації в мережу.

Кількість спожитої електроенергії в режимі тяги визначається за формулою (4.47):

$$A_{\text{тяги}} = \sum_{i=1}^h A_{\text{тяги}i}; \quad (4.47)$$

Кількість рекуперованої електроенергії поїздом в мережу під час рекуперативного гальмування визначається за формулою (4.48):

$$A_{\text{рек}} = \sum_{i=1}^h A_{\text{рек}i}; \quad (4.48)$$

Кількість спожитої електроенергії з мережі визначається за формулою (4.49):

$$A_{\text{мережі}} = A_{\Sigma} = A_{\text{тяги}} + A_{\text{вп}} - A_{\text{рек}}; \quad (4.49)$$

де $A_{\text{вп}}$ – кількість електроенергії, що спожита системами рухомого складу на власні потреби.

Кількість електроенергії, що спожита системами рухомого складу на власні потреби, визначається за формулою (4.50):

$$A_{\text{вп}} = P_{\text{спож}} \cdot t_{\Sigma}. \quad (4.50)$$

Восьмий етап (обирається раціональний режим ведення за головним критерієм – керуючий вплив, за якого спостерігається мінімальне значення спожитої з контактної мережі електроенергії на тягу).

За наявності одночасно декількох режимів ведення з однаковим мінімальним значенням спожитої електроенергії з мережі обирається той режим, за якого значення спожитої електроенергії в режимі тяги є мінімальним.

З використанням запропонованої математичної моделі та алгоритмічного забезпечення розроблено комп'ютерну програму «Rational Trajectory» (далі – КП «RT») для визначення раціонального режиму ведення рухомого складу за заданих умов експлуатації [222]. При цьому, розроблена КП «RT» дозволяє автоматизувати розрахунки динамічних та енергетичних показників рухомого складу під час його руху за умов раціонального режиму ведення. Розроблена КП «RT» включає в себе підпрограму «Спрямлення» та «Розрахунок кроку варіації». Програма розроблена в середовищі графічного програмування LabVIEW, головними перевагами якої є можливість реалізації алгоритмів високого рівня складності, простота реалізації, наявність зручного графічного інтерфейсу.

Зовнішній вигляд графічного інтерфейсу оператора КП «RT», зображено на рис. 4.16.

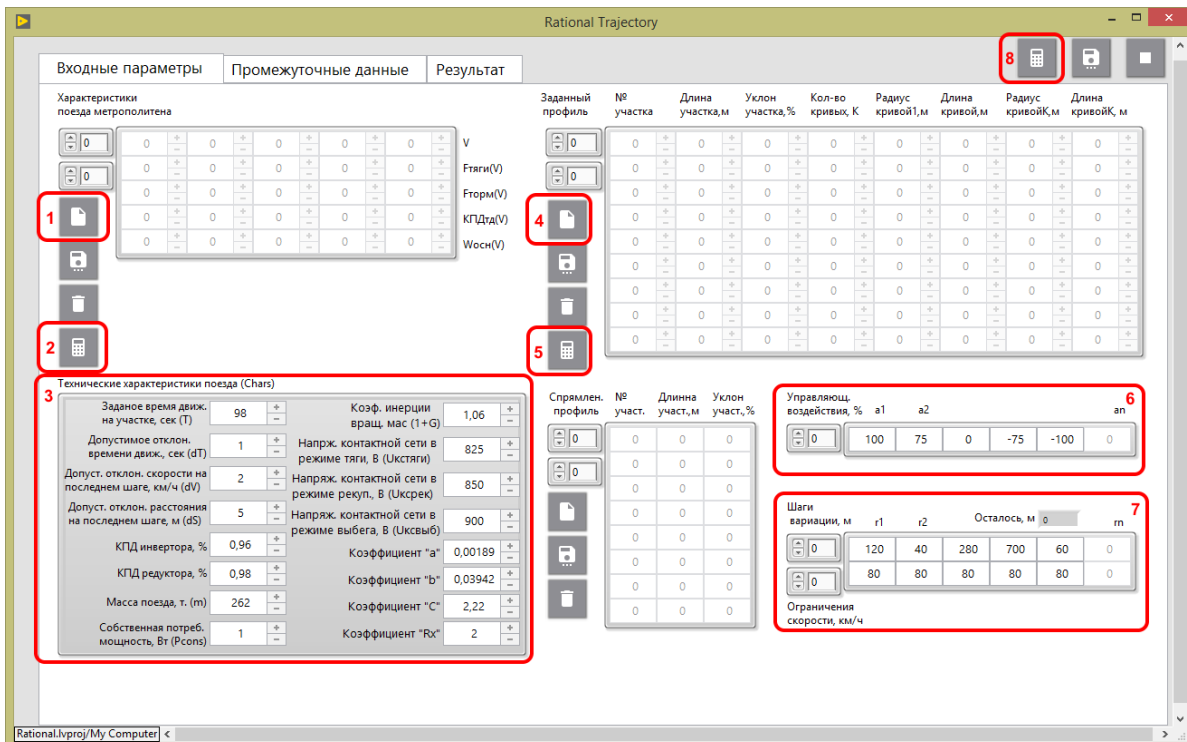


Рис. 4.16 – Загальний вигляд інтерфейсу КП «RT». Вкладка «Вхідні параметри»

Інтерфейс програми умовно поділений на кілька фрагментів за їх функціональним призначенням. Графічний інтерфейс оператора має три вкладки: вхідні параметри, проміжні дані та результат. При запуску КП «RT» завжди відкривається вкладка вхідні параметри, де оператор має змогу ввести всі необхідні для розрахунку дані та скористатись підпрограмою «Спрямлення» (етапи 1–4). Функціональне призначення інших двох вкладок – це відображення проміжних (етапи 5–7) та кінцевих результатів розрахунку (етап 8).

Створена КП «RT» під час своєї роботи використовує зовнішні файли даних, які розташовані у спеціальному вкладеному каталозі. Необхідно уникати видалення чи модифікації будь-якого файлу в цій директорії. В каталозі розміщуються наступні зовнішні файли: характеристики рухомого складу метрополітену, характеристики перегону, інструкція користувача КП «RT».

Після запуску програми перед оператором з'являється інтерфейс основного модулю програми (рис. 4.16).

Для введення розрахункових даних оператор повинен виконати наступну послідовність дій:

- за допомогою відповідної кнопки завантажити характеристики поїзда (рис. 4.16, позначка 1) або ввести їх вручну;
- натиснути перемикач (рис. 4.16, позначка 2), програма виконає розрахунок параметру $W_{\text{осн}}$ та дасть результат до попередньо введеного масиву даних;
- ввести технічні характеристики рухомого складу (рис. 4.16, позначка 3);
- завантажити характеристики перегону (рис. 4.16, позначка 4) або ввести їх вручну та виконати його спрямлення (рис. 4.16, позначка 5);
- вручну заповнити масив керуючих впливів (рис. 4.16, позначка 6) та кроки варіації разом з обмеженням за швидкістю для кожного кроку (рис. 4.16, позначка 7).

На рис. 4.17 представлено інтерфейс КП «RT» з введеними даними готовими для розрахунку.

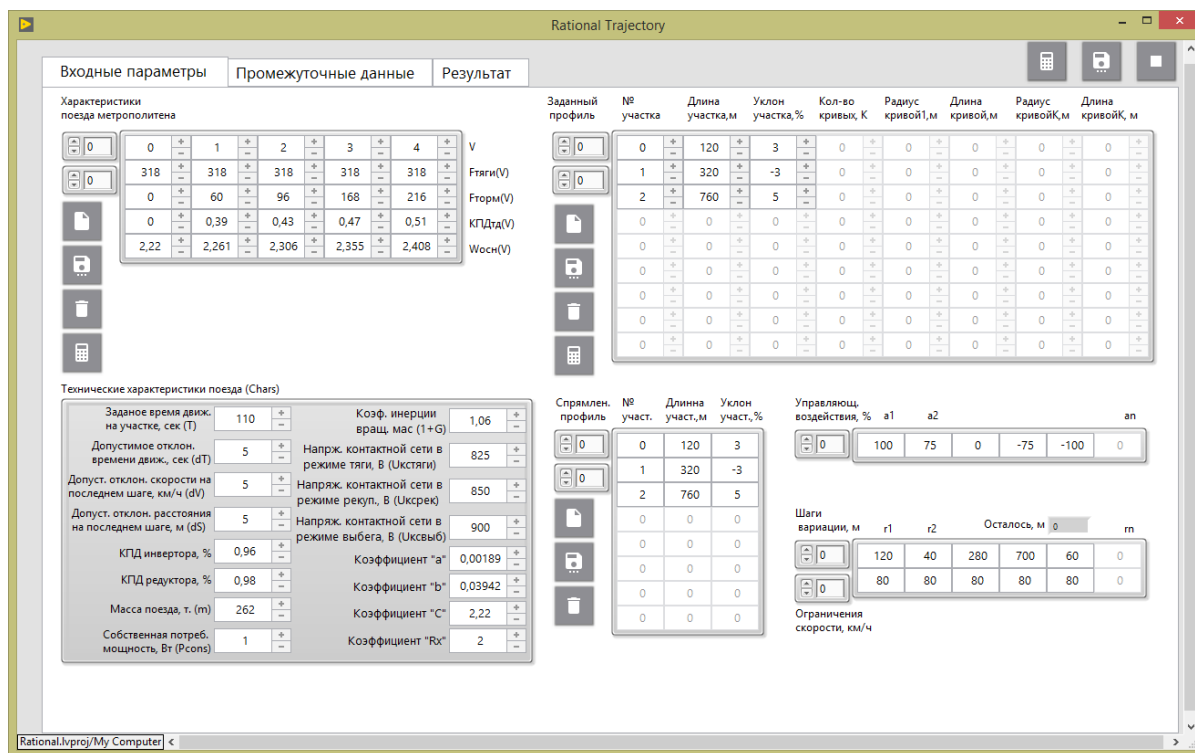


Рис. 4.17 – Загальний вигляд інтерфейсу КП «RT». Готовність до розрахунку

Для виконання розрахунку необхідно натиснути кнопку (рис. 4.16, позначка 8) та дочекатися завершення розрахунку.

У разі якщо розрахунок виконується безуспішно (відсутні раціональні режими ведення) перед оператором з'являється повідомлення «Рішення відсутні». При цьому, рекомендується змінити вхідні дані та повторити розрахунок.

На вкладці «Проміжні дані» (рис. 4.18) розміщені всі результати розрахунку, а саме: «Швидкісні сітки» (чотиривимірний масив даних), усі розраховані «Кроки варіації» (двохвимірний масив даних), усі результуючі кроки варіації («Результати»), що задовольняють вхідним обмеженням (двохвимірний масив).

На вкладці «Результат» (рис. 4.19), в якості одновимірного масиву представлений результат розрахунку – раціональний режим ведення, а також значення кількості електроенергії в режимі тяги, в режимі рекуперативного гальмування та їх різниці для цього режиму. Крім того на даній вкладці розміщений інформаційний індикатор часу, що було затрачено на виконання даного розрахунку.

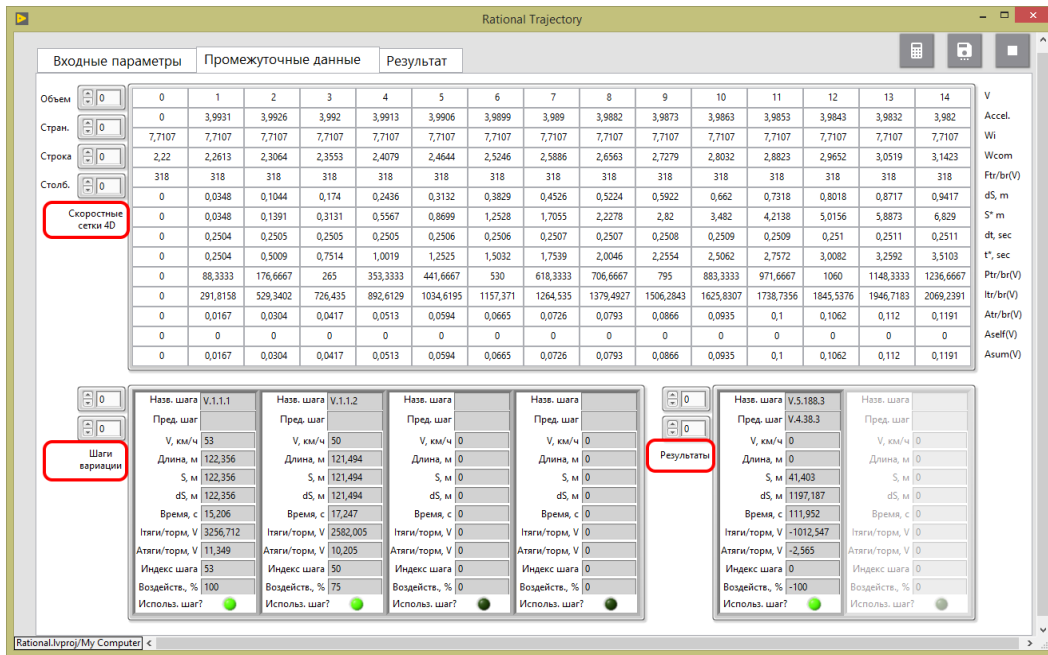


Рис. 4.18 – Загальний вигляд інтерфейсу КП «RT». Вкладка «Проміжні дані»

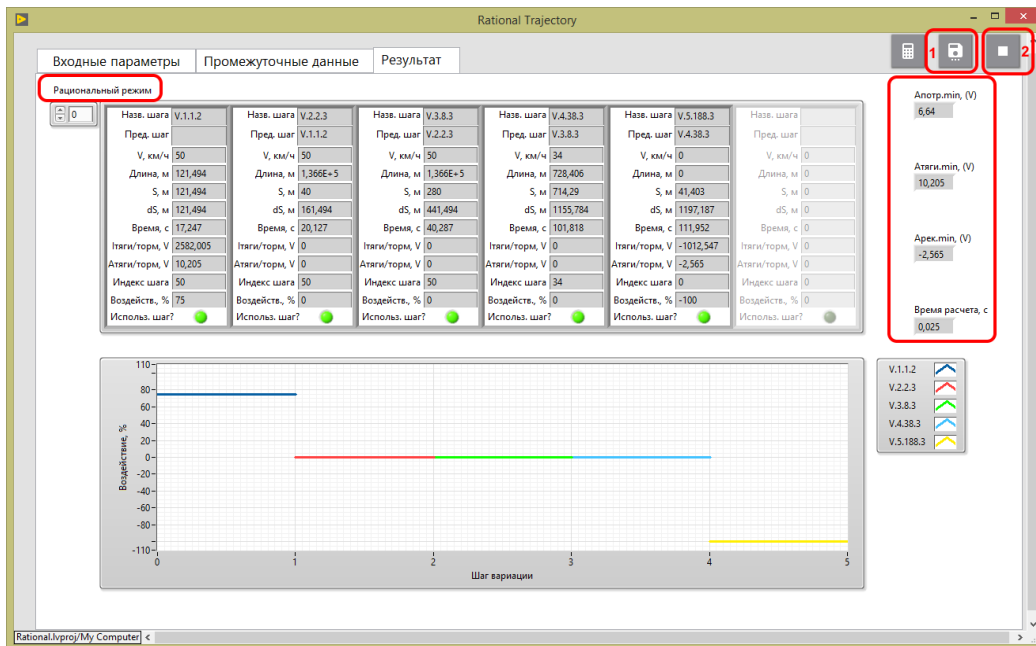


Рис. 4.19 – Загальний вигляд інтерфейсу КП «RT». Вкладка «Результат»

Після виконання розрахунку оператор має змогу зберегти результати у вигляді зовнішнього файлу-звіту (рис. 4.19, позначка 1). До цього файлу заносяться всі розраховані швидкісні сітки, вхідні характеристики рухомого складу, що використовувалися для розрахунку та двохвимірний масив результатів, що задовольняють вхідні обмеження. При цьому, раціональний режим ведення розміщується першим елементом масиву.

Під час кожного завантаження програми оператор отримує порожній інтерфейс для вводу вхідних даних для розрахунку. Може виникнути ситуація, коли необхідно буде повернутись до якогось розрахунку, виконаного раніше, та змінити значення кількох параметрів. Тому в програмі передбачена можливість збереження і завантаження значень всіх елементів вкладки «Вхідні параметри» у окремі зовнішні файли. Для цього слід використовувати елементи інтерфейсу з зображенням дискети.

Послідовність роботи з КП «RT»:

- запустити КП «RT» на виконання;
- ввести вхідні дані для розрахунку;
- виконати необхідні розрахунки;
- зберегти звіт з результатами розрахунку за необхідності;

– завершити роботу з програмою, натиснувши відповідну кнопку інтерфейсу програми (рис. 4.19, позначка 2).

Оцінку придатності розробленого КП «RT» виконано за точністю визначення основних вихідних динамічних та енергетичних параметрів, раціонального режиму ведення, під час заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену. Алгоритм тестування та оцінки заснований на принципі порівняння результатів досліджень, виконаних за допомогою КП «RT» та редактору Microsoft Excel, за однакових заданих умов.

Оцінка проводилась наступним чином:

– виконувались теоретичні розрахунки основних проміжних та кінцевих параметрів за допомогою редактору Microsoft Excel та КП «RT» для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену;
– придатність КП «RT» визначалась шляхом порівняння результатів досліджень, виконаних в редакторі Microsoft Excel та КП «RT».

Послідовність операцій, що виконуються під час оцінки придатності КП «RT» наступна:

– введення вхідних даних для виконання теоретичних розрахунків в редакторі Microsoft Excel;
– розрахунок динамічних та енергетичних параметрів руху поїзда, визначення раціонального режиму ведення в редакторі Microsoft Excel;
– збереження результатів теоретичних розрахунків в редакторі Microsoft Excel;
– введення вхідних даних для виконання теоретичних розрахунків в КП «RT»;
– розрахунок параметрів руху поїзда, визначення раціонального режиму ведення в КП «RT»;
– збереження результатів теоретичних розрахунків, виконаних КП «RT» в формі звітів;
– оцінка та порівняння результатів, виконаних за допомогою редактору Microsoft Excel та КП «RT».

Методика тестування та оцінки КП «RT» складалась з трьох окремих експериментів. При цьому, для кожного експерименту тягово-енергетичні характеристики поїзда однакові; керуючі впливи, кроки варіації, профіль колії – різні. Як дослідний обрано модернізований поїзд з системами рекуперації (вагони моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01). Як дослідну ділянку обрано Святошинсько-Броварську лінію КП «Київський метрополітен».

Умови проведення експериментів наступні:

1) досліджувана ділянка «Політехнічний університет–Шулявська» (довжина 1200 м). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі тяги – 3 ($\alpha_1=100\%$; $\alpha_2=75\%$; $\alpha_3=50\%$). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі рекуперативного гальмування – 2 ($\beta_1=100\%$; $\beta_2=75\%$). Кількість кроків варіації – 6 ($\tau_1=60$ м; $\tau_2=60$ м; $\tau_3=320$ м; $\tau_4=660$ м; $\tau_5=40$ м; $\tau_6=60$ м).

2) досліджувана ділянка «Театральна–Університет» (довжина 882,3 м). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі тяги – 2 ($\alpha_1=100\%$; $\alpha_2=75\%$). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі рекуперативного гальмування – 2 ($\beta_1=100\%$; $\beta_2=75\%$). Кількість кроків варіації – 5 ($\tau_1=120,7$ м; $\tau_2=255$ м; $\tau_3=146$ м; $\tau_4=280$ м; $\tau_5=80,6$ м).

3) досліджувана ділянка «Політехнічний університет–Шулявська» (довжина 1200 м). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі тяги – 3 ($\alpha_1=100\%$; $\alpha_2=75\%$; $\alpha_3=50\%$). Кількість керуючих впливів під час руху поїзда в режимі рекуперативного гальмування – 2 ($\beta_1=100\%$; $\beta_2=75\%$). Кількість кроків варіації – 5 ($\tau_1=120$ м; $\tau_2=40$ м; $\tau_3=280$ м; $\tau_4=700$ м; $\tau_5=60$ м).

За результатами проведення експериментів визначались наступні параметри: швидкісні сітки для кожного кроку варіації та профілю колії; час руху на дослідній ділянці, пройдена відстань, струм споживання, струм рекуперації, витрати електроенергії на тягу, кількість електроенергії, що повернуто до мережі.

Під час визначення одного або декількох вихідних параметрів похибка оцінювалась в такий спосіб:

– абсолютна похибка між даними, що отримані в результаті досліджень за допомогою редактору Microsoft Excel та КП «RT» за формулою (4.51):

$$\Delta = |X_{ME} - X_{RT}|, \quad (4.51)$$

де X_{ME} – значення параметру, отриманого в редакторі Microsoft Excel;

X_{RT} – значення параметру, отриманого в КП «RT»;

– відносна похибка за формулою (4.52):

$$\delta = \frac{|X_{ME} - X_{RT}|}{X_{RT}} \cdot 100. \quad (4.52)$$

Порівняльний аналіз результатів досліджень дозволив встановити, що для заданих однакових вхідних даних (профіль колії, керуючі впливи та кроки варіації) розбіжність значень основних вихідних параметрів не перевищує 5%. Отже, в цілому збіжність результатів задовільна, що свідчить про правильність та достовірність розробленого програмного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення рухомого складу та керуючих впливів під час заданих умов експлуатації.

4.4 Процедура визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії з використанням багатокритеріального методу оцінки та програмного забезпечення «Rational Trajectory»

В цьому розділі запропоновано розвинути теорію визначення раціональних параметрів бортових ЄНЕ (потужності та енергоємності) шляхом використання розробленої КП «RT». В ході виконання досліджень розроблено концептуально новий підхід, який ґрунтується на визначенні раціональних параметрів бортових ЄНЕ (потужності та енергоємності) за допомогою вирішення багатокритеріальної задачі методом головного критерію [223]. При цьому, як критерій оцінки прийнято масу, об'єм, термін окупності системи накопичення. Як головний критерій оцінки обрано мінімальний термін окупності системи накопичення, на інші два критерії – масу та об'єм системи накопичення встановлено обмеження. Обмеження за масою та об'ємом встановлюються з урахуванням технічних характеристик конкретної моделі поїзда.

Розроблений багатокритеріальний підхід визначення раціональних параметрів ЄНЕ для поїзда метрополітену передбачає використання теоретичних методів досліджень: теоретичні основи електричної тяги під час виконання тягових розрахунків, методи математичного та комп'ютерного моделювання під час побудови моделі для імітації штатних умов руху поїзда метрополітену з системами рекуперації на заданих ділянках профілю колії, сучасні методи математичної статистики для обробки даних комп'ютерного моделювання, принципи побудови раціональних режимів ведення поїзда за критеріями забезпечення заданого часу руху та мінімальної кількості споживання електроенергії з мережі методом головного критерію, методи техніко-економічного аналізу для оцінки вартості систем накопичення, методи порівняльного аналізу для визначення системи накопичення з раціональними параметрами за діаграмами терміну окупності від величин потужності та енергоємності, аналітичні методи досліджень для визначення кількості заощаджень та ступеню погіршення динаміки розгону поїзда за умов впровадження систем накопичення з раціональними параметрами.

Розроблений новий багатокритеріальний підхід з визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ для поїзда метрополітену складається з наступних етапів [223]:

- 1) вибір ділянки експлуатації та моделі поїзда метрополітену з системами рекуперації;
- 2) виконання тягових розрахунків (визначення масових обмежень для системи накопичення за результатами аналізу виконаних тягових розрахунків);
- 3) визначення обмежень за об'ємом для системи накопичення, виходячи з наявного вільного простору на поїзді метрополітену з системами рекуперації;
- 4) визначення типових штатних умов ведення поїзда на заданій ділянці колії;
- 5) визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену на заданій ділянці за допомогою розробленої КП «RT», а також моделювання динаміки руху та енергетичних процесів;
- 6) обробка даних комп'ютерного моделювання, за результатами якого визначаються максимальні значення потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування поїзда;
- 7) вибір параметрів бортових ЄНЕ з урахуванням отриманих максимальних значень потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування поїзда, а також їх обмежень за масою та об'ємом;
- 8) визначення вартості обраних систем накопичення з урахуванням витрат протягом їх життєвого циклу;
- 9) дослідження кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем;
- 10) побудова діаграм терміну окупності обраних систем накопичення;
- 11) визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ (потужності та робочої енергоємності) за результатами аналізу діаграм терміну окупності.

Після того, як визначено систему накопичення з раціональними параметрами бортового ЄНЕ, виконуються дослідження кількості заощадженої електроенергії від впровадження та її вплив на динаміку розгону поїзда.

Узагальнений математичний опис цільової функції розробленого багатокритеріального підходу з визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ можна представити у вигляді формули (4.28).

З урахуванням обраного критерію формулювання задачі раціоналізації: знайти такі значення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ ($P_{\text{ЄНЕ}}$, $A_{\text{ЄНЕ}}$), за яких термін окупності системи накопичення мінімальний (формула (4.29)).

При цьому, для цільової функції були встановлені такі граничні значення параметрів: $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots P_{\Delta m}]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots A_{\Delta m}]$, $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots P_{\Delta v}]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots A_{\Delta v}]$, $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots P_{\text{max}}]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots A_{\text{рекmax}}]$, де $P_{\Delta v}$, $A_{\Delta v}$ – максимальні значення потужності та енергоємності за об'ємом, які залежать від моделі поїзда метрополітену з системами рекуперації.

За умов, якщо цільова функція має декілька мінімальних значень, то обирається система накопичення, яка здатна заощаджувати максимальну кількість електроенергії (формула 4.30).

Із застосуванням запропонованого багатокритеріального підходу та програмного забезпечення «Rational Trajectory» визначено раціональну потужність та енергоємність бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації. Далі представлено результати поетапного дослідження раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ для обраного типу поїзда метрополітену та заданих умов його експлуатації.

Перший етап. Як дослідну обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Дослідний рухомий склад представляє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні (вагони метрополітену моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01). Дослідний рухомий склад зображено на рис. 4.20.



Рис. 4.20 – Дослідний рухомий склад

Другий етап (виконання тягових розрахунків) аналогічний тому, що наведено у розділі 3.4. Алгоритм виконання тягових розрахунків наведено на рис. 3.11. Тягові розрахунки виконано за формулами (3.13)–(3.18).

Результати тягових розрахунків, виконаних за формулами (3.13)–(3.18), представлено в табл. 3.10. За результатами тягових розрахунків для заданих умов встановлено, що маса системи накопичення для обраного типу поїзда не має перевищувати 7,86 т.

Третій етап. За результатами аналізу документації [224, 225] на вагони метрополітену моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01 встановлено, що максимальне значення вільного простору складає 1,5 м³. Тому, в подальшому під час здійснення вибору раціональних параметрів бортового ЄНЕ, як обмеження за об'ємом прийнято саме це значення.

Четвертий етап. Дослідження виконано для експлуатації поїзда з системами рекуперації у типових штатних умовах протягом доби за «піковим» та «непіковим» графіками руху. Завантаженість поїзда протягом доби у робочі та вихідні дні під час його «пікового» і «непікового» графіків руху залежно від перегону, зображено на рис. 4.7–4.9.

Прийнято, що експлуатація поїзда відбувається наступним чином:

- у робочі дні (п'ять днів на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіку руху: два кола з мінімальним завантаженням (рис. 4.7, а); одне коло – із завантаженням (рис. 4.7, б); два кола – із завантаженням (рис. 4.7, в); два кола – із завантаженням (рис. 4.7, г); та два повних кола з дотриманням «пікового» графіку (рис. 4.8);

- у вихідні дні (два дні на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіку: одне коло з мінімальним завантаженням (рис. 4.9, а); одне коло – із завантаженням (рис. 4.9, б); п'ять кіл – із завантаженням (рис. 4.9, в);

- протягом року поїзд експлуатується 315 днів, з яких 225 робочих і 90 вихідних.

П'ятий етап передбачає моделювання руху поїзда метрополітену з використанням розробленої та атестованої КП «РТ». За допомогою КП «РТ» визначено раціональні режими ведення поїзда метрополітену на заданому перегоні. Виконано моделювання динамічних та енергетичних процесів під час раціональних режимів ведення поїзда метрополітену на заданих перегонах. Вхідні дані, показники динамічних та енергетичних процесів, а також результуючі вихідні показники, які визначаються під час моделювання, формули розрахунків цих показників, більш детально розглянуто і описано в роботі [222] та розділі 4.3 цієї монографії. Кінцевим результатом є визначення таких показників як: кількість витраченої електроенергії на тягу ($A_{\text{тяги}}$), кількість електроенергії, що генерується поїздом під час рекуперативного гальмування ($A_{\text{рек}}$), максимальна потужність в режимі рекуперативного гальмування (P_{max}).

Шостий етап. Виконано обробку даних комп'ютерного моделювання. Обробку даних здійснено також з використанням КП «РТ». Результати обробки даних представлено в табл. 4.9–4.10.

Таблиця 4.9. Результати обробки даних під час руху поїзда у робочий день

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4.7, а) / завантаження поїзда (рис. 4.7, б) / завантаження поїзда (рис. 4.7, в) / завантаження поїзда (рис. 4.7, г) / «піковий» графік руху за умов максимального завантаження (рис. 4.8)		
	$A_{\text{тяги}}$, кВт·год	$A_{\text{рек}}$, кВт·год	P_{max} , МВт
Лісова–Чернігівська	4,73/5,04/5,96/5,6/8,45	2,15/2,31/3,05/3,35/5,44	2,07/2,12/2,33/3,33/4,36
Чернігівська–Дарниця	7,82/9,38/11,47/9,92/14,88	2,04/2,47/3,59/2,09/5,9	1,51/2,22/2,33/2,62/4,05
Дарниця–Лівобережна	7,75/7,89/11,56/12,06/13,65	1,72/2,22/3,06/3,42/4,19	1,2/1,32/1,31/2,46/1,81
Лівобережна–Гідропарк	7,39/8,25/11,73/12,46/14,24	3,26/4,02/5,05/5,93/8,75	1,54/1,82/2,8/3,09/4,77

Кінець таблиці 4.9

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4.7, а) / завантаження поїзда (рис. 4.7, б) / завантаження поїзда (рис. 4.7, в) / завантаження поїзда (рис. 4.7, г) / «піковий» графік руху за умов максимального завантаження (рис. 4.8)		
	А _{тяги} , кВт·год	А _{рек} , кВт·год	Р _{пик} , МВт
Гідропарк–Дніпро	13,28/14,25/19,04/21,76/22,65	2,37/2,84/6,43/7,11/8,89	1,71/1,89/2,98/3,03/4,13
Дніпро–Арсенальна	2,57/2,6/2,46/3,71/2,62	5,26/5,48/8,03/9,83/9,41	2,46/2,42/4,76/2,58/4,77
Арсенальна–Хрещатик	7,77/8,22/10,56/10,97/12,95	1,71/1,73/3,28/3,6/4,95	0,96/0,93/1,63/1,82/2,68
Хрещатик–Театральна	5,52/5,63/7,6/7,83/11,43	2,11/2,24/3,6/3,82/5,77	2,02/1,51/3,33/2,44/3,01
Театральна–Університет	5,42/6,37/7,46/8,01/9,64	1,17/1,72/2,39/2,26/3,66	0,83/1,03/2,78/2,54/2,22
Університет–Вокзальна	9,29/9,13/11,18/11,75/12,71	7,12/7,37/10,73/11,68/12,12	1,71/1,65/3,81/2,62/2,62
Вокзальна–Політехнічний інститут	10,4/10,69/12,86/13,18/15,62	2,53/3,88/4,59/5,2/5,61	2,27/1,91/3,89/3,97/4,2
Політехнічний інститут–Шулявська	7,97/8,14/10,22/11,62/13,03	1,55/1,46/2,78/3,44/4,22	1,81/0,9/1,59/2,3/3,49
Шулявська–Берестейська	44,41/44,08/56,28/67,52/66,54	4,43/5,3/5,25/6,06/7,56	3,41/3,67/4,82/4,78/4,82
Берестейська–Нивки	8,78/9,79/10,62/11,37/17,41	3,77/4,47/5,73/6,24/9,89	2,69/2,84/3,01/4,2/4,81
Нивки–Святошин	8,18/8,58/10,19/10,51/11,89	1,45/1,61/2,26/2,36/2,9	1,76/0,93/2,68/1,43/1,51
Святошин–Житомирська	3,87/4,05/5,81/5,84/8,54	7,32/7,69/10,45/12,41/14,89	1,81/1,81/2,83/2,94/3,09
Житомирська–Академмістечко	2,11/2,25/2,57/2,74/4,36	2,07/2,21/2,63/3,22/4,17	0,9/1,01/1,03/1,59/1,75
Академмістечко–Житомирська	14,43/15,21/17,75/18,36/22,77	4,2/4,53/4,7/5,62/7,21	1,29/1,98/2,02/2,86/4,52
Житомирська–Святошин	11,54/11,98/16,93/17,68/19,2	1,3/1,44/3,27/3,28/4,02	1,6/1,65/1,21/1,79/1,79
Святошин–Нивки	5,3/5,76/7,69/8,84/10,88	2,96/3,24/4,41/5,74/7,11	1,76/1,86/2,53/4,13/4,36
Нивки–Берестейська	9,45/10,18/11,18/12,24/15,09	1,46/1,69/2,26/2,53/4,58	1,76/0,98/1,47/2,86/3,65
Берестейська–Шулявська	2,12/2,07/2,85/2,84/4,45	23,15/23,51/33,1/37,77/43,49	1,65/1,73/4,2/2,7/3,09
Шулявська–Політехнічний інститут	6,17/6,42/8,07/10,39/12,53	2,44/2,35/3,88/5,29/6,38	2,22/2,22/3,65/4,05/4,28
Політехнічний інститут–Вокзальна	9,35/10,71/12,79/13,74/14,52	2,1/2,54/3,95/4,74/5,02	1,96/1,16/1,75/3,09/3,81
Вокзальна–Університет	5,9/6,03/7,02/7,3/10,08	1,97/1,89/2,81/3,21/4,07	1,09/1,05/1,55/2,32/2,68
Університет–Театральна	5,21/5,6/7,18/7,66/9,81	1,31/1,58/2,51/3,98/5,31	0,85/0,9/2,94/3,33/3,73
Театральна–Хрещатик	6,18/7,02/8,07/10,35/11,53	1,78/2,17/2,78/4,1/4,71	1,86/1,96/1,82/2,46/1,98
Хрещатик–Арсенальна	7,38/9,77/9,93/11,53/12,71	1,49/1,4/2,43/1,89/2,79	1,51/0,96/1,63/1,96/1,63
Арсенальна–Дніпро	13,8/14,91/17,63/19,09/19,6	0,3/0,43/0,57/0,38/0,42	0,7/0,57/1,19/0,95/1,27
Дніпро–Гідропарк	9,02/9,89/11,74/12,27/14,51	8,2/8,91/10,89/11,42/13,02	2,79/2,84/3,27/3,51/3,87
Гідропарк–Лівобережна	9,84/9,98/10,27/10,67/14,07	2,83/3,02/4,28/4,68/5,84	1,94/1,94/2,98/2,98/3,27
Лівобережна–Дарниця	8,19/8,45/9,48/10,08/11,73	4,82/5,06/5,68/6,41/7,81	2,13/2,44/3,57/3,73/4,77
Дарниця–Чернігівська	6,02/6,65/7,3/8,57/9,66	3,31/3,66/4,5/5,44/6,14	1,86/1,9/2,86/3,03/4,05
Чернігівська–Лісова	8,57/9,01/10,52/10,73/12,85	1,64/1,81/2,33/2,73/3,76	1,86/1,91/2,02/3,09/3,41

Таблиця 4.10. Результати обробки даних під час руху поїзда у вихідний день

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4.9, а) / завантаження поїзда (рис. 4.9, б) / завантаження поїзда (рис. 4.9, в)		
	А _{тяги} , кВт·год	А _{рек} , кВт·год	Р _{пик} , МВт
Лісова–Чернігівська	4,73/5,04/5,96	2,15/2,31/305	2,07/2,12/2,33
Чернігівська–Дарниця	7,82/9,38/11,47	2,04/2,47/3,59	1,51/2,22/2,33
Дарниця–Лівобережна	7,75/7,89/11,56	1,72/2,22/3,06	1,2/1,32/1,31
Лівобережна–Гідропарк	7,39/8,25/11,73	3,26/4,02/5,05	1,54/1,82/2,8
Гідропарк–Дніпро	13,28/14,25/19,04	2,37/2,84/6,43	1,71/1,89/2,98
Дніпро–Арсенальна	2,57/2,6/2,46	5,26/5,48/8,03	2,46/2,42/4,76
Арсенальна–Хрещатик	7,77/8,22/10,56	1,71/1,73/3,28	0,96/0,93/1,63
Хрещатик–Театральна	5,52/5,63/7,6	2,11/2,24/3,6	2,02/1,51/3,33
Театральна–Університет	5,42/6,37/7,46	1,17/1,72/2,39	0,83/1,03/2,78
Університет–Вокзальна	9,29/9,13/11,18	7,12/7,37/10,73	1,71/1,65/3,81
Вокзальна–Політехнічний інститут	10,4/10,69/12,86	2,53/3,88/4,59	2,27/1,91/3,89
Політехнічний інститут–Шулявська	7,97/8,14/10,22	1,55/1,46/2,78	1,81/0,9/1,59
Шулявська–Берестейська	44,41/44,08/56,28	4,43/5,3/5,25	3,41/3,67/4,82
Берестейська–Нивки	8,78/9,79/10,62	3,77/4,47/5,73	2,69/2,84/3,01
Нивки–Святошин	8,18/8,58/10,19	1,45/1,61/2,26	1,76/0,93/2,68
Святошин–Житомирська	3,87/4,05/5,81	7,32/7,69/10,45	1,81/1,81/2,83
Житомирська–Академмістечко	2,11/2,25/2,57	2,07/2,21/2,63	0,9/1,01/1,03
Академмістечко–Житомирська	14,43/15,21/17,75	4,2/4,53/4,7	1,29/1,98/2,02
Житомирська–Святошин	11,54/11,98/16,93	1,3/1,44/3,27	1,6/1,65/1,21
Святошин–Нивки	5,3/5,76/7,69	2,96/3,24/4,41	1,76/1,86/2,53
Нивки–Берестейська	9,45/10,18/11,18	1,46/1,69/2,26	1,76/0,98/1,47
Берестейська–Шулявська	2,12/2,07/2,85	23,15/23,51/33,1	1,65/1,73/4,2
Шулявська–КПІ	6,17/6,42/8,07	2,44/2,35/3,88	2,22/2,22/3,65
КПІ–Вокзальна	9,35/10,71/12,79	2,1/2,54/3,95	1,96/1,16/1,75
Вокзальна–Університет	5,9/6,03/7,02	1,97/1,89/2,81	1,09/1,05/1,55

Кінець таблиці 4.10

Досліджувана ділянка	«Непиковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4.9, а) / завантаження поїзда (рис. 4.9, б) / завантаження поїзда (рис. 4.9, в)		
	$A_{тяг}$, кВт·год	$A_{рек}$, кВт·год	P_{max} , МВт
Університет–Театральна	5,21/5,67/1,18	1,31/1,58/2,51	0,85/0,9/2,94
Театральна–Хрещатик	6,18/7,02/8,07	1,78/2,17/2,78	1,86/1,96/1,82
Хрещатик–Арсенальна	7,38/9,77/9,93	1,49/1,4/2,43	1,51/0,96/1,63
Арсенальна–Дніпро	13,8/14,91/17,63	0,3/0,43/0,57	0,7/0,57/1,19
Дніпро–Гідропарк	9,02/9,89/11,74	8,2/8,91/10,89	2,79/2,84/3,27
Гідропарк–Лівобережна	9,84/9,98/10,27	2,83/3,02/4,28	1,94/1,94/2,98
Лівобережна–Дарниця	8,19/8,45/9,48	4,82/5,06/5,68	2,13/2,44/3,57
Дарниця–Чернігівська	6,02/6,65/7,3	3,31/3,66/4,5	1,86/1,9/2,86
Чернігівська–Лісова	8,57/9,01/10,52	1,64/1,81/2,33	1,86/1,91/2,02

За результатами обробки даних математичного моделювання (табл. 4.9-4.10) зрозуміло, що значення максимальної потужності та кількості електроенергії під час рекупративного гальмування складають 4,82 МВт та 43,49 кВт·год відповідно. Отже, встановлено перші граничні значення параметрів бортового ЄНЕ за результатами аналізу отриманих даних: $P_{ЄНЕ} \in [0 \dots 4,82]$, $A_{ЄНЕ} \in [0 \dots 43,49]$. Інші граничні значення потужності та енергоємності визначаються з урахуванням обмежень за масою та об'ємом, і залежать від обраних типів бортових ЄНЕ.

Сьомий етап. Обрано параметри бортових ЄНЕ (потужність та енергоємність) з урахуванням прийнятих та визначених обмежень. Аналіз світового ринку ЄНЕ дозволив визначити виробників, що мають в асортименті продукцію, орієнтовану для застосування на транспорті. Це передусім, Maxwell Technologies Inc. (США), Nesscap (Корея), Ercos (Німеччина), IOXUS (США), ЗАО НПО «Технокор» (Росія), ООО МНПО «ЭКОНД» (Росія), ЗАО «Элит» (Росія), Yunasko (Україна). Подальший аналіз показав, що серед перерахованих виробників тільки обмежена кількість має повністю комерціалізовані рішення. Якнайповнішу технічну інформацію щодо пропонуваніх ємнісних накопичувачів, необхідну для їх обґрунтованого вибору, вдалося отримати у Maxwell Technologies Inc. Цей виробник пропонує, як окремі силові конденсатори, так і готові модулі, призначені для роботи в джерелах безперебійного живлення, транспортних підсистемах, системах рекуперації, гібридних накопичувачах енергії тощо. Тому, далі запропоновано здійснювати вибір раціональних параметрів бортових ЄНЕ саме з конденсаторних модулів зазначеного виробника. Загальний вигляд обраних конденсаторних модулів виробництва Maxwell Technologies Inc., що запропоновано розглянути як бортові ЄНЕ на поїзді, зображено на рис. 4.21.

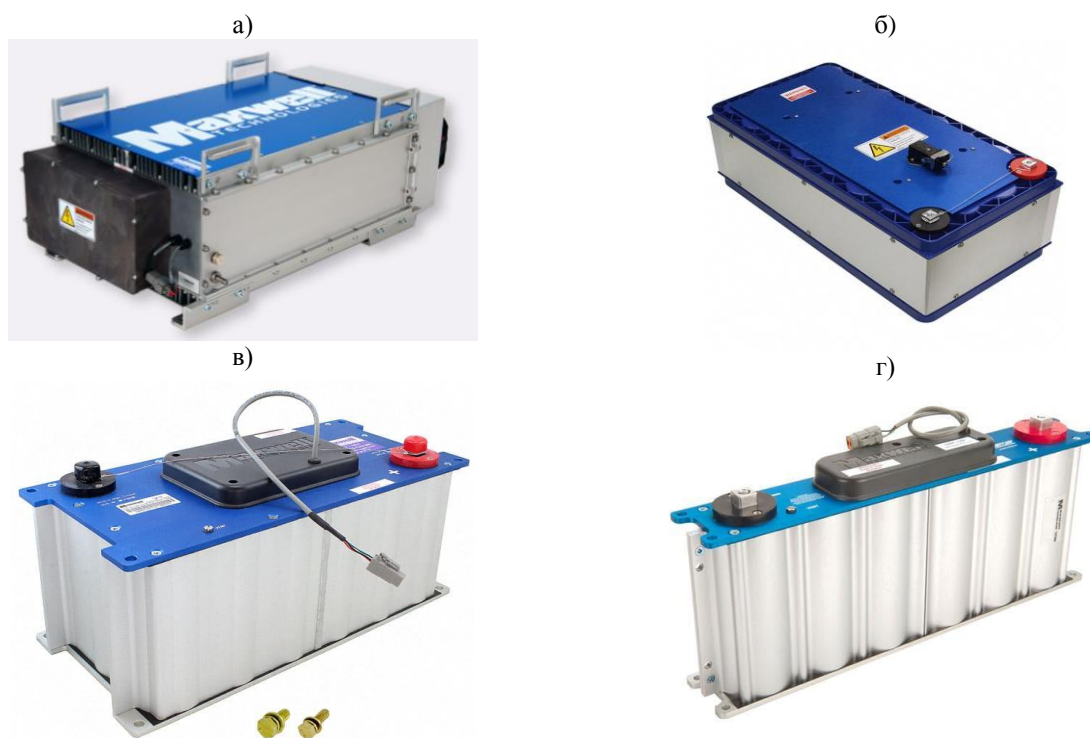


Рис. 4.21 – Загальний вигляд конденсаторних модулів виробництва Maxwell Technologies Inc.: BMOD0063P125 B08 (а), BMOD0094P075 B02 (б), BMOD0165P048 C01 (в), BMOD0500P016 B02 (г)

Технічні характеристики обраних конденсаторних модулів, наведено в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 Технічні характеристики обраних конденсаторних модулів

Найменування показника	Тип конденсаторного модуля			
	ВМ0D0063P125 B08	ВМ0D0094P075 B02	ВМ0D0165P048 C01	ВМ0D0500P016 B02
Робоча напруга, В	136-68	91-40,5	51-20,5	17-8,5
Номинальна ємність, Ф	63	94	165	500
Максимальна ємність, Ф	76	113	198	600
Внутрішній опір, МОм	18	13	6	2,1
Маса, кг	61	25	14,2	5,5
Загальна (максимальна) кількість енергії, яку здатний запасати накопичувач, кДж	703	468	257	24,1
Кількість енергії, що запасється в діапазоні робочої напруги, кДж	583	389	215	20,1
Габаритні розміри, мм	619x350x265	515x263x220	418x194x179	418x68x179
Максимальна потужність, кВт	220	108	97	30,3
Робоча температура, °С	-40...+65	-40...+65	-40...+65	-40...+65

Системи накопичення необхідного значення робочої напруги, потужності та енергоємності з урахуванням обмежень за масою та об'ємом було сформовано шляхом послідовно-паралельного з'єднання обраних конденсаторних модулів. Масу систем накопичення визначено шляхом сумування мас конденсаторних модулів (бортового СНЕ), керованих перетворювачів, металоконструкцій, з'єднувальних проводів (шин), датчиків струму та напруги, елементів систем охолодження і керування та інших додаткових матеріалів.

Аналогічним чином визначено і об'єм систем накопичення, зібраних з вищенаведених конденсаторних модулів та іншого комплектуючого обладнання до них. Розрахунки об'ємів систем виконано з урахування допусків на монтаж силового та допоміжного комплектуючого обладнання.

Для систем накопичення з обраних конденсаторних модулів визначено граничні максимальні значення потужності та енергоємності з урахуванням встановлених обмежень за масою та об'ємом. Результати розрахунків робочої напруги, граничних максимальних значень потужності та енергоємності систем накопичення, наведено в табл. 4.12.

Таблиця 4.12. Результати розрахунків систем накопичення з обраних конденсаторних модулів

Параметр (характеристика)	Тип конденсаторного модуля			
	ВМ0D0063P125 B08	ВМ0D0094P075 B02	ВМ0D0165P048 C01	ВМ0D0500P016 B02
1	2	3	4	5
Діапазон робочої напруги, В	952-476	910-405	918-459	935-468
Максимальне значення потужності з урахуванням обмежень за масою, МВт	15,8	18,9	28,3	143,0
Максимальне значення енергоємності з урахуванням обмежень за масою, кВт·год	11,6	18,9	18,4	4,4
Максимальне значення потужності з урахуванням обмежень за об'ємом, МВт	3,1	3,0	5,3	5,0
Максимальне значення енергоємності з урахуванням обмежень за об'ємом, кВт·год	2,3	3,0	3,4	1,0

Отже, за результатом розрахунків (табл. 4.12) визначено інші граничні значення потужності та енергоємності систем накопичення з урахуванням обмежень за масою та об'ємом. За результатами аналізу даних табл. 4.12 помітно, що обмеження за об'ємом у порівнянні з масою є більш «жорсткими».

З урахуванням визначених обмежень за обробкою даних математичного моделювання та за масою і об'ємом остаточно встановлено такі граничні значення параметрів:

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу ВМ0D0063P125B08 – $P_{\text{СНЕ}} \in [0...3,1]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0...2,3]$;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу ВМ0D0094P075B02 – $P_{\text{СНЕ}} \in [0...3,0]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0...3,0]$;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу ВМ0D0165P048C01 – $P_{\text{СНЕ}} \in [0...4,82]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0...3,4]$;

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу ВМ0D0500P016B02 – $P_{\text{СНЕ}} \in [0...5,0]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0...1,0]$.

Виходячи із отриманих остаточних граничних значень параметрів систем накопичення, для подальших розрахунків залежно від типу конденсаторних модулів обрано бортові СНЕ з рівнем максимальної потужності і робочої енергоємності, які наведено в табл. 4.13.

Таблиця 4.13. Обрані параметри бортових СНЕ

Тип конденсаторного модуля	Потужність, МВт	Енергоємність, кВт·год
ВМ0D0063P125 В08	1,5; 3,1	1,1; 2,3
ВМ0D0094P075 В02	1,1	1,1
ВМ0D0165P048 С01	1,7; 3,3; 4,8	1,1; 2,2; 3,2
ВМ0D0500P016 В02	1,7; 3,3	0,3; 0,6

В даному випадку обрано 8 систем накопичення з різним рівнем потужності і енергоємності бортових СНЕ, які задовольняють розрахованим обмеженням.

Восьмий етап. Здійснено оцінку вартості систем накопичення за результатами техніко-економічного аналізу вартості обраних бортових СНЕ, реверсивних перетворювачів та іншого комплектуючого обладнання від фірм-виробників даної продукції. Результати такого аналізу для обраних бортових СНЕ, наведено у табл. 4.14.

Таблиця 4.14. Вартість обраних систем накопичення

Робоча енергоємність, кВт·год	Вартість з урахуванням різної потужності бортових СНЕ [МВт], млн. грн.					
	1,1	1,5	1,7	3,1	3,3	4,8
ВМ0D0063P125 В08						
1,1	-	1,68	-	-	-	-
2,3	-	-	-	3,12	-	-
ВМ0D0094P075 В02						
1,1	1,38	-	-	-	-	-
ВМ0D0165P048 С01						
1,1	-	-	1,24	-	-	-
2,2	-	-	-	-	2,38	-
3,2	-	-	-	-	-	3,42
ВМ0D0500P016 В02						
0,3	-	-	1,32	-	-	-
0,6	-	-	-	-	2,53	-

Виконаний техніко-економічний аналіз дозволив встановити, що основними складовими вартості систем накопичення є власне бортовий СНЕ та реверсивний перетворювач. При цьому, питома вартість обраних систем накопичення залежно від їх параметрів та типу застосованих конденсаторних модулів складає від 2,3 млн. грн. до 3,7 млн. грн. за 1 т.

Дев'ятий етап полягає у дослідженні кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення. Процедура досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії за цим етапом є аналогічною до кількох попередніх підходів (див. стор. 45, 46), тому зупинятись на ній детально не має необхідності.

Під час досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії прийнято наступні припущення: перед проведенням розрахунків накопичувач повністю розряджений, ККД накопичувача складає 0,98 ($\eta_{\text{СНЕ}}=0,98$), ККД реверсивного перетворювача – 0,96 ($\eta_{\text{PI}}=0,96$), ККД редуктора – 0,98 ($\eta_{\text{РЕД}}=0,98$), ККД тягового двигуна ($\eta_{\text{ТД}}$) змінюється за залежністю, яку представлено на рис. 4.22.

Спрощений алгоритм виконання цих досліджень показано на рис. 3.9.

З використанням вищезазначеного алгоритму (рис. 3.9) та формул (3.7)–(3.10) визначено кількість заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення.

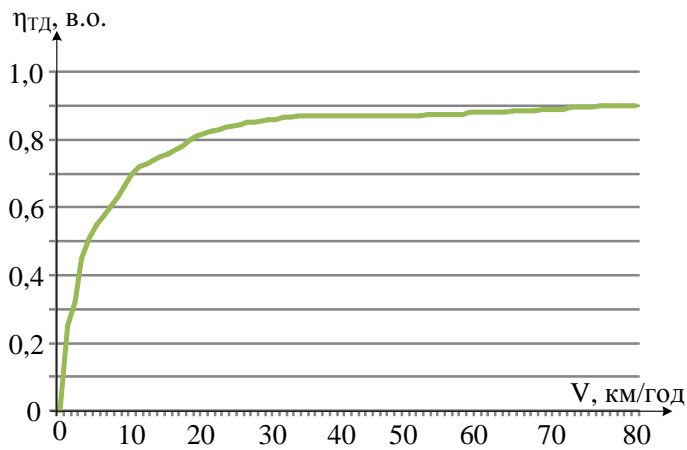


Рис. 4.22. Залежність коефіцієнта корисної дії тягового двигуна від швидкості руху

Десятий етап передбачає побудову характеристик (діаграм) терміну окупності систем накопичення залежно від робочої потужності та від енергоємності обраних бортових СНЕ.

Величина терміну окупності визначається за відношенням вартості від впровадження системи накопичення до вартості заощадженої електроенергії цією системою за рік згідно з формулою (3.11). При цьому $T_e = 3,42$ грн/кВт·год.

Результати розрахунку терміну окупності для обраних систем накопичення зображено у вигляді діаграм на рис. 4.23.

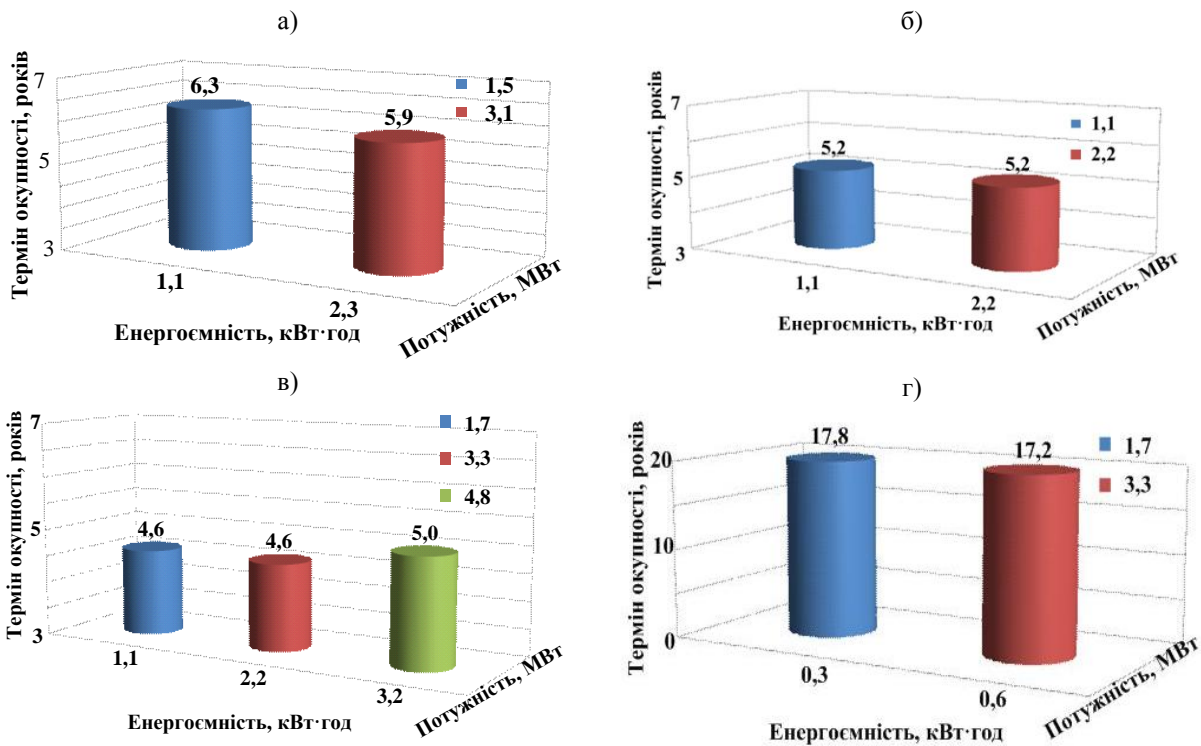


Рис. 4.23. Діаграми терміну окупності обраних систем накопичення, зібраних з конденсаторних модулів типу VMOD0063P125 B08 (а); VMOD0094P075 B02 (б); VMOD0165P048 C01 (в); VMOD0500P016 B02 (г)

Одинадцятий етап (визначення системи з раціональними параметрами). За результатами аналізу діаграм терміну окупності обраних систем накопичення зрозуміло, що для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену найбільш раціональною є система з величиною робочої енергоємності 2,2 кВт·год та максимальною потужністю 3,3 МВт, зібраної з конденсаторних модулів типу VMOD0165P048 C01 (рис. 4.2 3). Термін окупності цієї системи складає 4,6 роки, маса – 0,92 т, об'єм – 0,94 м³.

За умов впровадження системи накопичення з раціональними параметрами розраховано кількість заощадженої електроенергії за відношенням до кількості спожитої електроенергії за формулою (3.12).

За формулою (3.12) визначено, що для заданих умов експлуатації впровадження системи накопичення з раціональними параметрами бортового СНЕ дозволить заощадити 14,8 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу. При цьому, маса системи накопичення з раціональними параметрами складає близько 0,4 % та

0,6 % від маси поїзда метрополітену з максимальним завантаженням та в порожньому стані відповідно. За умов розміщення цієї системи накопичення показники динаміки розгону поїзда зменшаться на 0,4 %.

Таким чином, з використанням розробленого підходу оцінки параметрів, який ґрунтується на використанні комп'ютерної моделі для визначення раціонального режиму ведення поїзда на перегоні та вирішенні багатокритеріальної задачі методом головного критерію, визначено раціональні параметри бортового ЄНЕ (максимальну потужність та робочу енергоємність) для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену з системами рекуперації. За умов впровадження системи накопичення з раціональними параметрами виконано кількісну оцінку заощадженої електроенергії та її вплив на характеристики поїзда під час розгону.

4.5 Аналіз результатів досліджень з визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії за розробленими підходами з використанням програмного забезпечення

Для розроблених підходів на основі теоретичних методів досліджень з використанням комп'ютерних програм «Motion Simulation» та «Rational Trajectory» визначено параметри бортового ЄНЕ під час однакових штатних заданих умов експлуатації на одному й тому ж самому рухомому складі метрополітену з системами рекуперації (див. рис. 2.1, рис. 4.20). Процедури розроблених підходів з визначення бортових ЄНЕ для рухомого складу метрополітену детально описано в попередніх розділах 4.2, 4.4.

Параметри тягових асинхронних двигунів (ТАД), що встановлені на дослідному поїзді метрополітену, наступні: $P_n = 150$ кВт; $U_n = 610$ В; $I_n = 185$ А; $n_n = 1900$ об/хв; $f_n = 65$ Гц; $M = 2,21$ кН·м. Параметри тягової передачі та поїзда метрополітену: $D = 0,825$ м; $\eta_{ред} = 0,975$; $\mu = 6,95$; $m = 238,7$ т (номінальне завантаження); $G_{зч} = 1,44$ кН; $(1+\gamma) = 1,06$; $a = 1,2$ м/с².

Під час досліджень прийнято наступні однакові умови: маса системи накопичення для обраного типу поїзда не має перевищувати 7,86 т; дослідження виконано для експлуатації поїзда у типових штатних умовах протягом доби за «піковим» та «непіковим» графіками руху; завантаження поїзда протягом доби у робочі та вихідні дні під час його «пікового» та «непікового» графіків руху залежно від перегону, зображено на рис. 4.7–4.9.

Прийнято, що експлуатація поїзда відбувається наступним чином:

– у робочі дні (п'ять днів на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіку руху: два кола з мінімальним завантаженням (рис. 4.7, а); одне коло – із завантаженням (рис. 4.7, б); два кола – із завантаженням (рис. 4.7, в); два кола – із завантаженням (рис. 4.7, г); та два повних кола з дотриманням «пікового» графіку (рис. 4.8);

– у вихідні дні (два дні на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіку: одне коло з мінімальним завантаженням (рис. 4.9, а); одне коло – із завантаженням (рис. 4.9, б); п'ять кіл – із завантаженням (рис. 4.9, в);

– протягом року поїзд експлуатується 315 днів, з яких 225 робочих і 90 вихідних.

Як дослідні обрано такі типи конденсаторних модулів: ВМ0063Р125 В08, ВМ00094Р075 В02, ВМ00165Р048 С01, ВМ00500Р016 В02 (рис. 4.21) виробництва Maxwell Technologies Inc.

Під час досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії прийнято наступні припущення: перед проведенням розрахунків накопичувач повністю розряджений, ККД накопичувача складає 0,98 ($\eta_{ЄНЕ}=0,98$), ККД реверсивного перетворювача – 0,96 ($\eta_{РП}=0,96$), ККД редуктора – 0,98 ($\eta_{РЕД}=0,98$), ККД тягового двигуна ($\eta_{ТД}$) змінюється за залежністю, яку представлено на рис. 4.22. Під час розрахунку терміну окупності системи накопичення прийнято тариф на електроенергію $T_e = 3,42$ грн/кВт·год.

Обробку даних комп'ютерного моделювання з використанням програмного забезпечення «Motion Simulation» та «Rational Trajectory» наведено в табл. 4.5, 4.6 та табл. 4.9, 4.10 відповідно.

Для багатокритеріального підходу з використанням комп'ютерної програми «Rational Trajectory» встановлено обмеження $1,5$ м³ за об'ємом для системи накопичення, виходячи з аналізу документації на вагони метрополітену моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01.

Результати визначення параметрів бортового ЄНЕ для кожного з підходів та техніко-економічні показники за умов їх впровадження, приведено в табл. 4.15.

Таблиця 4.15 – Результати порівняльного аналізу

Назва показника	Визначення раціональних параметрів бортових ЄНЕ та показників руху поїзда	
	Підхід з використанням програмного забезпечення «Motion Simulation»	Багатокритеріальний підхід з використанням програмного забезпечення «Rational Trajectory»
1	2	3
Максимальна потужність, кВт	4800	3300
Робоча енергоємність, кВт·год	3,2	2,2

Кінець таблиці 4.15

1	2	3
Тип конденсаторного модуля	BMOD0165P048 C01	BMOD0165P048 C01
Діапазон робочої напруги бортового ЄНЕ, В	918-459	918-459
Маса системи накопичення, т	1,38	0,92
Об'єм системи накопичення, м ³	1,41	0,94
Термін окупності, років	4,4	4,6
Кількість заощадженої електроенергії, %	19,7	14,8
Відношення маси системи накопичення до маси поїзда, %	0,5-0,9	0,4-0,6
Прискорення поїзда під час розгону, м/с ²	1,23	1,23
Погіршення прискорення поїзда під час розгону, %	0,5	0,4

Результати визначених параметрів та їх порівняльний аналіз (табл. 4.5, 4.6, 4.9, 4.10, 4.15), отриманих за допомогою розроблених підходів на основі теоретичних методів досліджень з використанням програмного забезпечення «Motion Simulation» та «Rational Trajectory» за однакових заданих вхідних умов, дозволив встановити наступне:

– головними перевагами обох підходів є застосування теоретичних методів досліджень замість даних експериментальних досліджень, що в значній мірі дозволить зменшити фінансові витрати на проведення досліджень, строки виконання досліджень, можливість врахування техніко-економічної складової та реальних умов експлуатації поїзда метрополітену, універсальність;

– головною перевагою застосування багатокритеріального підходу з використанням програмного забезпечення «Rational Trajectory» є здійснення вибору раціональних параметрів бортового ЄНЕ за трьома важливими критеріями – обмеженнями за масою, об'ємом та мінімальним терміном окупності системи накопичення. При цьому типові режими ведення поїзда на перегоні замінюються одним раціональним режимом ведення, який визначається на підставі забезпечення заданого графіку руху на ділянці та критерію мінімального споживання електроенергії з контактної мережі;

– для заданих вхідних умов залежно від застосування того чи іншого підходу термін окупності систем накопичення з раціональними параметрами складає 4,4 або 4,6 років, маса – 0,92 або 1,38 т, об'єм – 0,94 або 1,41 м³. При цьому впровадження систем накопичення з раціональними параметрами дозволить заощадити кількість спожитої електроенергії 14,8 % або 19,7 % від об'єму спожитої електроенергії поїздом на тягу та погіршити динаміку розгону поїзда на 0,5 % або 0,4 % за умов незмінного значення пускової сили тяги.

Отже, найбільш доцільним як з технічної, так і економічної точки зору, є визначення раціональних параметрів бортових ЄНЕ з використанням теоретичних методів досліджень. Особливий інтерес має визначення параметрів за багатокритеріальним методом з використанням програмного забезпечення «Rational Trajectory», оскільки він дозволяє обґрунтувати раціональний вибір системи накопичення відразу за трьома важливими критеріями (мінімальною вартістю, обмеженнями за масою та об'ємом).

Висновки за розділом 4

1. Розроблено ПЗ «Motion Simulation», яке дозволяє моделювати рух поїзда метрополітену для заданих умов його ведення та одночасно досліджувати динамічні та енергетичні показники під час руху. Порівняльний аналіз результатів досліджень, отриманих за допомогою ПЗ «Motion Simulation» та експериментальним шляхом, показав задовільну збіжність (максимальна похибка не перевищила 5 %), що свідчить про правильність прийнятих припущень математичної моделі, яка є основою ПЗ «Motion Simulation» та можливість його використання в подальшому.

2. Удосконалено методологію визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ в частині заміни використання даних експериментальних досліджень теоретичними дослідженнями, суть яких полягає у моделюванні руху поїзда метрополітену з системами рекуперації за допомогою програмного забезпечення, що дозволить зменшити фінансові витрати та час виконання досліджень. Отримали подальшого розвитку наукові основи з теоретичного дослідження раціональних параметрів бортових ЄНЕ для поїзда метрополітену з системами рекуперації в напрямку розширення використання спеціалізованого програмного забезпечення.

3. З використанням запропонованого підходу оцінки параметрів, в основу якого покладено методи теоретичних досліджень з використанням програмного забезпечення «Motion Simulation», визначено раціональні параметри бортового ЄНЕ (максимальну потужність та робочу енергоємність) для заданих умов експлуатації та штатних режимів ведення рухомого складу метрополітену з системами рекуперації. За резуль-

татами виконаних досліджень встановлено, що для заданих режимів ведення рухомого складу раціональним є застосування системи накопичення з бортовим ЄНЕ, зібраного з конденсаторних модулів типу 30ЕК404, робоча енергоємність якого складає 1,7 кВт·год, а максимальна потужність – 0,8 МВт. Визначено, що термін окупності цієї системи складає 3,2 роки, а маса – 1,2 тони.

4. Впровадження системи накопичення з раціональними параметрами для заданих умов експлуатації дозволить заощадити близько 11,4 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу. При цьому маса системи накопичення з раціональними параметрами складає близько 0,5 % та 0,8 % від маси поїзда метрополітену з максимальним завантаженням та в порожньому стані відповідно. За умов встановлення цієї системи накопичення динаміка розгону поїзда погіршиться на 0,5 %.

5. Розроблено алгоритмічне забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда та керуючих впливів під час заданих умов експлуатації поїзда метрополітену, в основу якого покладено вирішення багатокритеріальної задачі за методом задоволення вимог (головного критерію). При цьому, головним критерієм є мінімальна кількість споживання електроенергії з контактної мережі. На інші критерії (час руху на перегоні, пройдений шлях та швидкість руху в кінці останнього кроку варіації) накладаються певні задані обмеження та допустимі відхилення. Розроблене алгоритмічне забезпечення стало передумовою для створення програмного забезпечення.

6. Розроблено КП «RT», яка дозволяє автоматизувати процес визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену для заданих умов його експлуатації та досліджувати при цьому динамічні та енергетичні показники. Результати досліджень, отримані за допомогою редактора Microsoft Excel та КП «RT», відрізняються не більше ніж на 5 %. Порівняльний аналіз показав задовільну збіжність результатів, що свідчить про правильність та достовірність виконання досліджень за допомогою розробленого програмного забезпечення. Тому, КП «RT» можливо доцільно використовувати для визначення раціонального режиму ведення рухомого складу та керуючих впливів під час заданих умов експлуатації, за яких забезпечується графік руху на ділянці та споживається мінімальна кількість електроенергії з контактної мережі. Це програмне забезпечення дозволить зменшити час і вартість виконання досліджень, а також підвищить точність отримання результатів.

7. Вперше запропоновано підхід з визначення раціональних параметрів бортових ЄНЕ для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену з системами рекуперації, який ґрунтується на використанні програмного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда на перегоні та вирішенні багатокритеріальної задачі методом головного критерію, що дозволяє враховувати масогабаритні та вартісні показники систем накопичення.

8. З використанням запропонованого підходу, який складається з окремих одинадцяти етапів, встановлено, що для обраного типу поїзда, заданих умов його експлуатації, обраних типів систем накопичення, раціональним є застосування системи накопичення з бортовим ЄНЕ, зібраного з конденсаторних модулів типу ВМ0D0165P048 C0, робоча енергоємність якого складає 2,2 кВт·год, а максимальна потужність – 3,3 МВт. Визначено, що термін окупності системи складає 4,6 років, маса – 0,92 т; об'єм – 0,94 м³.

9. Впровадження системи накопичення з раціональними параметрами для заданих умов експлуатації дозволить заощадити близько 14,8 % від об'єму спожитої електроенергії на тягу. При цьому, маса системи накопичення з раціональними параметрами складає близько 0,4 % та 0,6 % від маси поїзда метрополітену з максимальним завантаженням та в порожньому стані відповідно. За умов встановлення цієї системи накопичення динаміка розгону поїзда зменшиться на 0,4 %.

10. За допомогою розроблених підходів на основі теоретичних методів досліджень з використанням програмного забезпечення «Motion Simulation» та «Rational Trajectory» визначено параметри бортового ЄНЕ для однакових заданих вхідних умов, а саме типу рухомого складу метрополітену, штатних заданих умов його експлуатації, обраних типів конденсаторних модулів виробництва Maxwell Technologies Inc. Встановлено, що раціональними є системи накопичення, зібрані з конденсаторних модулів типу ВМ0D0165P048 C0, робоча енергоємність яких складає 3,2 кВт·год та 2,2 кВт·год, а максимальна потужність – 4,8 МВт та 3,3 МВт відповідно. Визначено, що термін окупності цих систем складає 4,4 роки та 4,6 років, маса – 0,92 т та 1,38 т, об'єм – 0,94 м³ та 1,41 м³. При цьому впровадження систем накопичення з раціональними параметрами дозволить заощадити близько 19,7 % та 14,8 % від об'єму спожитої електроенергії поїздом на тягу та погіршити динаміку розгону поїзда на 0,5 % та 0,4 % за умов незмінного значення пускової сили тяги.

11. Дістали подальшого розвитку дослідження з аналізу резервів енергозбереження на рухомому складі метрополітену за рахунок випровадження на ньому системи визначення раціонального режиму ведення, систем рекуперації та накопичення.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці технічного рішення системи накопичення енергії рекупративного гальмування рухомого складу метрополітену на базі конденсаторних модулів.

РОЗДІЛ 5

СИСТЕМА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ НА БАЗІ КОНДЕНСАТОРНИХ МОДУЛІВ

Аналіз результатів виконаних досліджень у попередніх розділах підтвердив доцільність застосування на рухомому складі метрополітену бортових СНЕ порівняно незначної потужності та енергоємності. Не дивлячись на те, що в останній час спостерігається значний прогрес в розвитку технології виробництва ємнісних накопичувачів енергії, перетворювальної техніки і систем керування, все ж використання потужних та енергоємних накопичувачів енергії в даний час є проблематичним [12, 41, 86, 189, 199]. При цьому, основними перепонами є масогабаритні параметри накопичувачів та перетворювачів, а також їх вартість. Тому, під час розробки технічного рішення системи накопичення на базі конденсаторних модулів необхідно враховувати цей факт. Виходячи із зазначеного, в основу розробки технічного рішення поставлено задачу створення системи накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену на базі конденсаторних модулів за рахунок спрощення конструкції, зменшення масогабаритних параметрів і вартості, а також розширення функціональних можливостей. При цьому, має бути забезпечено достатню ефективність керування енергообмінними процесами між контактною мережею, електродвигунами рухомого складу та бортовим ємнісним накопичувачем енергії під час штатних і аварійних режимів роботи системи тягового енергозабезпечення рухомого складу метрополітену.

В результаті проведеного аналізу та досліджень розроблено технічне рішення системи накопичення енергії рекуперативного гальмування для рухомого складу метрополітену, сутність якого представлено у вигляді принципової блок-схеми системи накопичення енергії (рис. 5.1).

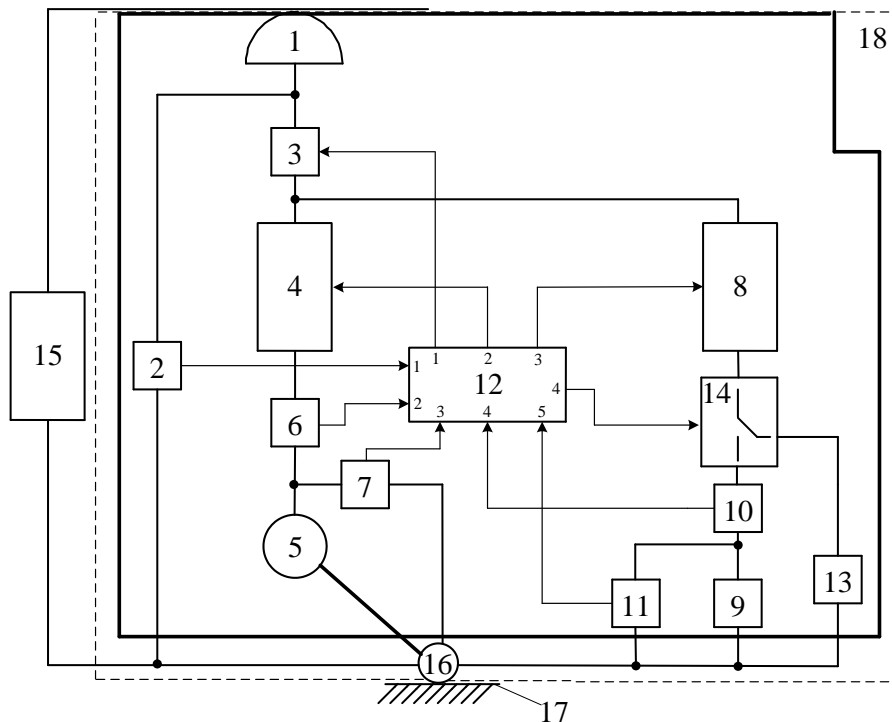


Рис. 5.1 – Система накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену

Система накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену містить струмоприймач 1, датчик напруги контактної мережі 2, керований комутатор контактної мережі 3, блок перетворення електроенергії 4, електродвигун 5, датчик струму електродвигуна 6, датчик напруги електродвигуна 7, реверсивний перетворювач 8, ємнісний накопичувач 9, датчик струму накопичувача 10, датчик напруги накопичувача 11, блок керування 12, гальмівний резистор 13 та керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14.

Струмоприймач 1, виконаний з можливістю з'єднання з контактною мережею 15, послідовно з'єднаний з електродвигуном 5 через керований комутатор контактної мережі 3, блок перетворення електроенергії 4 і датчик струму електродвигуна 6. Вихід струмоприймача 1 з'єднаний з датчиком напруги контактної мережі 2. Датчик напруги електродвигуна 7 паралельно підключений до електродвигуна 5. Електродвигун 5 виконаний з можливістю механічного з'єднання з приводними колесами рухомого складу 16 і рейкою 17. Вхід реверсивного перетворювача 8 з'єднаний з виходом керованого комутатора контактної мережі 3, а

його вихід з'єднаний з накопичувачем 9 та гальмівним резистором 13 через керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14.

Ємнісний накопичувач 9, виконаний у вигляді конденсаторних модулів, підключений до реверсивного перетворювача 8 та з'єднаний з датчиком струму накопичувача 10 і датчиком напруги накопичувача 11 відповідно послідовно і паралельно.

Гальмівний резистор 13 призначений для поглинання надлишкової енергії рекуперації і з'єднаний з ємнісним накопичувачем 9 паралельно.

Блок керування 12, виконаний у вигляді мікропроцесора, призначений для здійснення в автоматичному режимі керування енергообмінними процесами між контактною мережею 15, електродвигуном 5 та ємнісним накопичувачем 9. Входи 1-5 блоку керування 12 з'єднані з датчиками 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а його виходи 1-4 з'єднані з керованим комутатором контактної мережі 3, блоком перетворення електроенергії 4, реверсивним перетворювачем 8 та керованим перемикачем накопичувача і гальмівного резистора 14 відповідно.

Блок керування 12 під час будь-якого режиму ведення (тяги, вибігу, рекуперативного гальмування) на входи 1-5 отримує сигнали з датчиків 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а через виходи 1-4 здійснює керування енергообмінними процесами.

Датчик 2 контролює напругу контактної мережі 15, датчик 6 – струм електродвигуна 5, датчик 7 – напругу електродвигуна 5, датчик 10 – струм накопичувача 9, датчик 11 – напругу ємнісного накопичувача 9.

Система, розміщена на рухомому складі метрополітену 18, має працювати у штатних та аварійних режимах роботи системи енергозабезпечення рухомого складу метрополітену.

Далі наведено пояснення щодо роботи системи за штатних умов експлуатації рухомого складу для режимів тяги, вибігу та рекуперативного гальмування.

Режим тяги.

Першочерговий рух рухомого складу метрополітену 18 здійснюється шляхом підключення струмоприймача 1 до контактної мережі 15 за допомогою контактного проводу (не показаний). При цьому рухомий контакт струмоприймача 1 з'єднаний з нерухомим контактом контактної мережі 15. Електродвигун 5, що отримує енергію від блока перетворення електроенергії 4, з'єднаний через керований комутатор контактної мережі 3 з контактною мережею 15, приводить у дію приводне колесо 16, що рухається по рейці 17. При цьому, контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – замкнений; група ключів блоку перетворення електроенергії 4 працює в режимі замкнення-розімкнення та регулює напругу на електродвигуні 5; ключі реверсивного перетворювача 8 – розімкненні; керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14 в положенні замкнення кола гальмівного резистора 13. Ємнісний накопичувач 9 знаходиться в розрядженому стані.

У разі попередньо зарядженого накопичувача, електродвигун 5 отримує енергію від блока перетворення електроенергії 4 через реверсивний перетворювач 8 з ємнісного накопичувача 9. При цьому, контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – розімкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розімкнення та регулюють напругу на електродвигуні 5; ключі реверсивного перетворювача 8 працюють в режимі замкнення-розімкнення та регулюють напругу та струм в колі ємнісного накопичувача 9; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола ємнісного накопичувача 9.

У разі розрядження ємнісного накопичувача 9, живлення електродвигуна 5 здійснюється від контактної мережі 15. При цьому, контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – замкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розімкнення та регулюють напругу на електродвигуні 5; ключі реверсивного перетворювача 8 – розімкненні; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола гальмівного резистора 13.

Режим вибігу.

Струмоприймач 1 з'єднаний з контактною мережею 15 за допомогою контактного проводу (не показаний) і отримує від неї електроенергію.

При цьому, контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – замкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 – розімкненні; ключі реверсивного перетворювача 8 – розімкненні; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола гальмівного резистора 13. Таким чином, електродвигун 5 від'єднаний від контактної мережі 15 та ємнісного накопичувача 9.

Режим рекуперативного гальмування.

У даному режимі ведення рухомого складу метрополітену 18 електродвигун 5 відключається від контактної мережі 15 та працює в режимі генератора. Блок керування 12 через виходи 1-4 здійснює процес заряду ємнісного накопичувача 9. При цьому, контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – розімкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розімкнення; ключі реверсивного перетворювача 8 працюють в режимі замкнення-розімкнення та регулюють струм і напругу заряду ємнісного накопичувача 9; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола ємнісного накопичувача 9. Рівень заряду ємнісного накопичувача 9 контролюють датчики 10 та 11.

У разі повного заряду ємнісного накопичувача 9, блок керування 12 здійснює перевірку умов наявності інших споживачів в контактній мережі 15 за допомогою датчика напруги контактної мережі 2. За напруги контактної мережі 15, значення якої менше за задане, що відповідає значенню напруги холостого ходу

тягової підстанції, блок керування 12 подає сигнал на замкнення керованого комутатора контактної мережі 3 та розмикання ключів реверсивного перетворювача 8. При цьому, ключі блоку перетворення електроенергії 4 залишаються працювати в режимі замкнення-розімкнення, керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола ємнісного накопичувача 9. За відсутності споживачів електроенергії в контактній мережі 15, блок керування 12 подає сигнал на розмикання керованого комутатора контактної мережі 3 на роботу ключів реверсивного перетворювача 8 в режимі замкнення-розімкнення та переключення керованого перемикача гальмівного резистора і накопичувача 14 в положення включення кола гальмівного резистора 13, ключі блоку перетворення електроенергії 4 при цьому залишаються в режимі замкнення-розімкнення. Надлишкова енергія, що генерується електродвигуном 5, поглинається гальмівним резистором 13.

Аварійний режим роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

У разі зменшення напруги в контактній мережі 15 до значення 550 В і нижче або у разі її аварійного відключення, датчик напруги контактної мережі 2 направляє сигнал на вхід 1 блока керування 12, який в свою чергу через вихід 1 формує команду на розрив і направляє її керованому комутатору контактної мережі 3. В результаті розривається з'єднання електродвигуна 5 з контактною мережею 15.

Блок керування 12 направляє сигнал на замикання контакту керуючого перемикача гальмівного резистора і накопичувача 14 та роботу ключів реверсивного перетворювача 8 в режимі замкнення-розімкнення, після чого живлення електродвигуна 5 здійснюється від ємнісного накопичувача 9. Блок перетворення електроенергії 4 та реверсивний перетворювач 8 забезпечують живлення електродвигуна 5 до використання повного об'єму електроенергії ємнісного накопичувача 9.

Одночасно датчик напруги контактної мережі 2 контролює стан напруги контактної мережі 15. Після підвищення напруги в контактній мережі 15 до значення більшого, ніж 550 В, за сигналом датчика напруги контактної мережі 2, блок керування 12 подає команду на замикання контакту керованого комутатора контактної мережі 3 і подальше живлення електродвигуна 5 здійснюється від контактної мережі 15 з одночасною зарядкою ємнісного накопичувача 9 до мінімального значення робочої напруги.

Таким чином, створено компактну багатофункціональну систему накопичення енергії рекуперативно-гальмування рухомого складу метрополітену на базі конденсаторних модулів, здатну підвищити енергоефективність перевізного процесу в метрополітені.

Висновки за розділом 5

У порівнянні з відомими запропоноване технічне рішення дозволяє суттєво зменшити вартість та масогабаритні параметри, а також розширити функціональні можливості системи для накопичення енергії рекуперативно-гальмування, насамперед, завдяки використанню реверсивного перетворювача меншої потужності та бортового ємнісного накопичувача меншої потужності і енергоемності. Крім того, включення до складу пристрою керованого перемикача накопичувача і гальмівного резистора, а також застосування блока керування іншого конструктивного виконання дозволяє автоматизувати керування енергообмінними процесами між контактною мережею, електродвигунами рухомого складу, бортовим ємнісним накопичувачем і забезпечити ефективне використання електроенергії рекуперації в штатних та аварійних режимах роботи системи енергозабезпечення рухомого складу метрополітену.

ВИСНОВКИ

1. В монографії розглянуто та проаналізовано сучасний стан проблеми підвищення енергоефективності тягового залізничного транспорту. Встановлено, що найбільш перспективним та раціональним заходом з підвищення енергоефективності тягового залізничного рухомого складу є ефективне використання енергії, що повертається у мережу під час рекуперативного гальмування, шляхом впровадження систем накопичення. Визначено, що одним з найбільш перспективних видів транспорту для впровадження накопичувачів енергії є метрополітен в силу особливостей умов експлуатації його рухомого складу: стабільний графік руху у порівнянні з іншими видами залізничного транспорту; чітко виражений імпульсний характер навантаження; незначні відстані між станціями, як наслідок, часті пуски та гальмування; часто змінюваний профіль колії; необхідність частого розгону та сповільнення внаслідок обмеження швидкості для різних ділянок колії. Встановлено, що в системі енергозабезпечення метрополітену, найбільш раціональним є розташування накопичувачів на рухомому складі. Окреслено маловивчені і актуальні питання стосовно застосування бортових накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації, вирішення яких дозволить підвищити його енергоефективність та отримати максимальний техніко-економічний ефект на даному виді транспорту. Узагальнення існуючих дослідних матеріалів за цим напрямком дозволило сформулювати задачі подальших досліджень.

2. Розроблено вимірну систему для експериментального дослідження енергообмінних процесів між контактною мережею та рухомим складом метрополітену з системами рекуперації. За результатами виконаних експериментально-розрахункових досліджень для заданих типових умов експлуатації рухомого складу метрополітену між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії визначено кількісні показники електроенергії, що генерується до контактної мережі та виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах. Встановлено, що найбільш вагомим фактором, який здійснює вплив на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії, є профіль колії на перегоні.

3. В монографії обґрунтовано доцільність застосування ємнісних накопичувачів енергії (іоністорів) на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації. Також в цій монографії запропоновано удосконалити ряд наукових підходів та процедур щодо визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії, призначеного для застосування у системі накопичення для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену, які базуються на використанні основних положень теорії імовірності та вартісного аналізу з використанням даних експериментальних досліджень. Запропоновано двокритеріальний підхід, який дозволяє визначати раціональні параметри бортового ємнісного накопичувача енергії для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену, з урахуванням параметрів маси та вартісних показників систем накопичення. На підставі даних експериментальних досліджень визначено кількісні показники потенціальних заощаджень енергоресурсів від впровадження кожного варіанту бортової системи накопичення для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з використанням удосконалених та вперше розроблених підходів.

4. Для реалізації моделювання руху складу метрополітену з системами рекуперації під час заданих режимів його ведення розроблене програмне забезпечення «Motion Simulation» у середовищі графічного програмування LabView. Удосконалено методологію визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії в частині заміни експериментальних даних теоретичними дослідженнями з використанням програмного забезпечення «Motion Simulation». Застосування цього програмного забезпечення дозволить зменшити вартість та час виконання таких досліджень. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення «Rational Trajectory» для визначення раціонального режиму ведення поїзда для заданих умов експлуатації, в основу якого покладено вирішення багатокритеріальної задачі методом задоволення вимог.

Вперше запропоновано підхід з визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену з системами рекуперації, який ґрунтується на використанні програмного забезпечення «Rational Trajectory» та вирішення багатокритеріальної задачі. За допомогою розроблених підходів з використанням програмного забезпечення «Motion Simulation» та «Rational Trajectory» визначено раціональні параметри бортових ємнісних накопичувачів енергії та кількісні показники заощадження енергоресурсів від їх впровадження для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену. В монографії дістали подальшого розвитку дослідження стосовно аналізу резервів енергозбереження на рухомому складі метрополітену за рахунок впровадження на ньому систем рекуперації та накопичення енергії, а також розвинуто наукові основи з дослідження раціональних параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для поїзда метрополітену в частині використання програмного забезпечення.

5. Створено технічне рішення багатofункціональної системи накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену на базі конденсаторних модулів (іоністорів) незначної потужності та енергоємності, здатної забезпечити ефективне використання електроенергії рекуперативного гальмування в штатних та аварійних режимах роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

Таким чином, в цій монографії дістала подальшого розвитку теорія створення енергоощадного рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, яка заснована на впровадженні, як додаткового джерела живлення, бортового ємнісного накопичувача енергії, що дозволить ефективно використовувати енергію рекуперативного гальмування поїзда та розширити його технічні можливості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Інформація про Українські залізниці. Залізничний транспорт. Міністерство інфраструктури України. URL: <http://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zaliznici.html>
- 2 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.
- 3 Саблін О.І., Кузнецов В.Г. Проблеми та перспективи ефективного використання рекуперації електроенергії в системі електротранспорту. // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2013. № 2. С. 126–130.
- 4 Кузнецов В.Г., Саблін О.І. Визначення потенціалу енергозбереження в системах електротранспорту в задачах підвищення ефективності споживання енергії рекуперації. // Електрифікація транспорту. 2016. № 12. С. 107–114.
- 5 Черемісін В.Т., Нікіфоров М.М., Ушаков С.Ю. та ін. Етапи реалізації автоматизованої системи моніторингу енергоефективності перевізного процесу. // Залізничний транспорт. 2015. № 3. С. 45–49.
- 6 Шевлюгин М.В. Повышение энергетических показателей работы системы тягового электроснабжения железных дорог с помощью накопителей энергии. // НТТ – Наука и техника транспорта. 2007. № 1. С. 68–72.
- 7 Пасько О.В., Тананян Р.С. Розробка методів і засобів підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування на залізницях постійного струму. // Збірник наукових праць УкрДУЗТ. Х.: УкрДУЗТ, 2017. Вип. № 173. С. 167–175.
- 8 Накопители энергии : учеб. пособие для вузов / Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р., Васюкевич П.В.: под ред. Д.А. Бута. М.: Энергоатомиздат, 1991. 400 с.
- 9 Астахов Ю.Н., Веников В.А., Тер-Газарян А.Г. Накопители энергии в электрических системах: учеб. пособие для электроэнерг. спец. вузов. М.: Высш. школа, 1989. 159 с.
- 10 Пат. 2419563 Российская Федерация, МПК В60W 10/04, В60L 11/02. Способ управления силовой установкой и устройство для его реализации / Коссов Е.Е., Никипель С.О.; патентообладатель: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). № 2009144792/11; заявка 03.12.2009; опубл. 27.05.2011, Бюл. № 15. 8 с.
- 11 Никипель С.О. Повышение эффективности работы тепловозов при применении накопителя энергии в силовой цепи: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Никипель Сергей Олегович ; Моск. гос. ун-т путей сообщения. М., 2011. 167 с. Библиогр.: с. 143–154.
- 12 Коссов Е.Е., Никипель С.О. Применение накопителей малой энергоемкости в силовой цепи тепловоза. // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. Луганськ, 2010. № 5 (147). Частина 1. С. 246–248.
- 13 Коссов Е.Е., Азаренко В.А., Корнев А.Н., Комарицкий М.М. Влияние эффективности накопителя энергии на топливную экономичность локомотива. // Локомотив-информ. 2008. № 3. С. 44–45.
- 14 Коссов Е.Е., Азаренко В.А., Комарицкий М.М. К вопросу выбора мощности характеристик перспективного автономного тягового подвижного состава. // Наука и транспорт. 2007. Спецвыпуск. С. 20–21.
- 15 Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Бакшаев О.К., Мовчан А.С. Исследование возможности повышения экономичности электрической передачи на маневровом тепловозе при использовании накопителей энергии. // Локомотив-информ. 2010. № 11. С. 8–9.
- 16 Лосев Е.П. Эффективность применения накопителей энергии в силовых установках автономных локомотивов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Лосев Евгений Петрович ; Моск. гос. ун-т путей сообщения. М., 2000. 211 с. Библиогр.: с. 160–173.
- 17 Носков В.Н. Сверхпроводниковые индуктивные накопители энергии в энергоустановках железнодорожного транспорта: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Носков Владимир Николаевич ; Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2010. 209 с. Библиогр.: с. 156–164.
- 18 Носков В.Н., Пустоветов М.Ю. Об энергоемкости накопителя энергии для тепловоза. // Вестник ВНИИЖТ. М.: ВНИИЖТ, 2008. № 5. С. 42–44.
- 19 Устенко А.В., Пасько О.В. Использование накопителей энергии для улучшения параметров локомотивов. // Локомотив-информ. 2012. № 10. С. 4–6.
- 20 Черняк Ю.В., Гатченко В.О., Гаюр А.В. Аналіз існуючих і перспективних напрямів застосування рекуперативних систем на транспорті з метою підвищення його енергоефективності. Збірник наукових праць ДЕТУТ: Серія «Транспортні системи і технології». К.: ДЕТУТ, 2014. Вип. 24. С. 134–139.

- 21 Писарев Л.Т., Черняк Ю.В., Терованесов М.Р. Рекуперативное торможение поездов с использованием импульсных энергоемких конденсаторов. // *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк: ДонІЗТ, 2009. Вип. 17. С. 97–106.
- 22 Титова Т.С., Евстафьев А.М. Повышение энергетической эффективности локомотивов с накопителями энергии. // *Известия ПГУПС*. СПб, 2017. № 2. С. 200–210.
- 23 Литвинов А.В. Расчет эффективности применения накопителей электрической энергии на тепловозах, их параметров и условий размещения. // *Молодой ученый*. 2016. № 22 (126). С. 40–44.
- 24 Яровий Р.О. Моделювання тягового електроприводу маневрового локомотиву з накопичувачем енергії у силовому ланцюгу. // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. Сєвєродонецьк, 2015. № 1 (218). С. 284–287.
- 25 Румянцев М.В., Глушенков В.А. Тяговый привод транспортных средств с конденсаторным накопителем. // *Коммунальное хозяйство городов*. 2009. № 88. С. 259–263.
- 26 Володарець М.В. Визначення необхідної енергоємності накопичувачів енергії та потужності силової установки маневрового тепловозу із гібридною тягою. // *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк: ДонІЗТ, 2011. Вип. 26. С. 1–3.
- 27 Фалендиш А.П., Володарець М.В. Розробка моделі для вибору потужнісних характеристик маневрового тепловозу з гібридною передачею. // *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. Донецьк: ДонІЗТ, 2010. Вип. 24. С. 122–130.
- 28 Бірюков О.С., Фалендиш А.П., Золотухін І.В. Модернізація маневрового тепловоза ЧМЭЗТ з метою зменшення витрати палива і значного зниження викидів шкідливих речовин. // *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Х.: УкрДАЗТ, 2011. Вип. 126. С. 157–160.
- 29 Фалендиш А.П., Володарець М.В., Артеменко О.В. Визначення раціональних параметрів гібридного маневрового тепловоза на базі ЧМЕЗ. // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. Сєвєродонецьк, 2015. № 1 (218). С. 253–256.
- 30 Сергієнко М.І., Панасенко М.В., Пелепейченко В.І., Гордієнко Д.О. Оцінка ефективності застосування накопичувачів електроенергії в енергетичній установці дизель-поїзда ДЕЛ-02. // *Залізничний транспорт України*. 2011. № 4. С. 29–35.
- 31 Сергієнко М.І., Пелепейченко В.І., Гончаров О.М., Гордієнко Д.О. Оцінка ефективності варіантів модернізації енергетичної установки маневрового тепловоза ЧМЭЗ. // *Залізничний транспорт України*. 2011. № 6. С. 35–38.
- 32 Сергієнко М.І., Гончаров О.М., Пелепейченко В.І., Гордієнко Д.О. Вибір характеристики керування гібридною енергетичною установкою перспективного маневрового тепловоза. // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. Луганськ, 2011. № 4 (158). С. 122–132.
- 33 Сергієнко М.І., Гончаров О.М., Пелепейченко В.І., Мокроусов С.Д. Прогнозування ресурсу дизелів перспективних енергетичних установок для маневрового тепловоза ЧМЭЗ. // *Залізничний транспорт України*. 2012. № 5. С. 40–44.
- 34 Щербakov В.П., Сергієнко М.І., Каграманян А.О., Пелепейченко В.І. Зменшення викидів азоту дизелем маневрового тепловозу шляхом застосування гібридної енергетичної установки. // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. Луганськ, 2012. № 5 (176). Частина 1. С. 173–179.
- 35 Гончаров О.М., Кінтер С.О., Терещак Ю.В. Аналіз передумов модернізації маневрових тепловозів Львівської залізниці гібридною енергетичною установкою. // *Залізничний транспорт України*. 2014. № 6. С. 19–25.
- 36 Варакин А.И., Варакин И.Н., Менухов В.В. Маневровый и универсальный локомотив с гибридной силовой установкой и накопителем энергии на базе электрохимических конденсаторов. // *Наука и техника транспорта*. 2007. № 2. С. 34–40.
- 37 Варакин И.Н., Менухов В.В., Самитин В.В. Применение электрохимических конденсаторов ЗАО «ЭЛТОН» в составе гибридных энергосиловых установок на карьерном автотранспорте. // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. Горные машины. 2008. Отдельный выпуск 8: С. 106–115.
- 38 Варакин И.Н., Менухов В.В. «Элтон» предлагает – качество, надежность, экономичность. // *Евразия вести*. Элтранс, 2009. Вып. 10. С. 22–23.
- 39 Пат. RU 2296383 С2 Российская Федерация, МПК H01G 9/155. Электрохимический конденсатор / Варакин И.Н., Кильганова Е.А., Менухов В.В., Разумов С.Н., Самитин В.В., Тарасов С.В.; патентообладатель: Разумов С.Н. № 2004137643/09; заявка 23.12.2004; опубл. 27.03.2007, Бюл. № 9. 9 с.
- 40 Varakin I.N., Kilganova Ye.A., Klementov A.P., Litvinenko S.V., Menukhov V.V., Samitin V.V., Starodubtsev N.F., Stepanov A.B. In Proceedings of “The 7-13th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices”, 1997-2003, Deerfield Beach, Florida, USA.

- 41 Авилов В.Д., Москалев Ю.В., Писаренко С.А. Определение энергоемкости и мощности накопителя энергии для грузового электровоза постоянного тока. // Известия Транссиба. 2013. №4(16). С. 51–58.
- 42 Ананьева О.С., Подольская В.Н. Методика расчета переходных процессов при совместной работе системы тягового электроснабжения метрополитена с накопителями электрической энергии. // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. Гомель, 2017. № 2(35). С. 17–21.
- 43 Бычкова М.П. Энергоэффективные технологии метро. // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2011. № 5(22). С. 34–36.
- 44 Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро. // Энергосовет. 2011. № 3(16). С. 74–76.
- 45 Бычкова М.П. Энергосбережение в метро. // Транспорт Российской Федерации. 2010. Специальный выпуск «Наука и транспорт. Метрополитены будущего». С. 67.
- 46 Бялобржеський О.В. Энергозбереження в електротехнологічних установках та пристроях з електричними накопичувачами енергії. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчук, 2009. № 10/2009 (38). С. 141–145.
- 47 Бялобржеський О.В., Шипунова І.В. Енергетичні показники режиму гальмування машини постійного струму з передачею енергії на конденсаторний накопичувач. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». Донецьк: ДонНТУ, 2013. № 1 (14). С. 53–58.
- 48 Деклараційний патент UA 83779 U Україна, МПК В60L 13/00. Пристрій накопичення електричної енергії тягового електричного комплексу електровоза / О.В. Бялобржеський, І.В. Шипунова; патентовладелец: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; № u2013 05046; заявка 19.04.2013; опубл. 25.09.2013, Бюл. № 18. 4 с.
- 49 Васильев В.А. Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока : автореф. дис. канд. ... техн. наук: 05.22.07 / Васильев Виталий Алексеевич; Петербургский гос. ун-т путей сообщения. СПб, 2012. 16 с.
- 50 Васильев В.А. Анализ возможности применения емкостных накопителей энергии. // Известия ПГУПС. СПб, 2011. № 1. С. 35–44.
- 51 Веселов П.А. Исследование возможности реализации энергии рекуперативного торможения на межпоездной обмен. // Точная наука. 2017. № 6. С. 8–10.
- 52 Деньщиков К.К. Комбинированные энергетические установки на основе суперконденсаторов. // Конференция ОИВТ РАН «Результаты фундаментальных исследований в области энергетики и их практическое значение». М., 24-26 марта 2008, Российская Федерация.
- 53 Деньщиков К.К. Суперконденсаторы: принципы построения, техника и применения. // Ученый совет ОИВТ РАН. М., 2013, Российская Федерация.
- 54 Колб А.А. Аккумуляция энергии рекуперации электрифицированного транспорта с помощью емкостных энергонакопителей. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2010. Вип. 31. С. 89–94.
- 55 Колб А.А. Использование энергии рекуперации электротранспорта для управления качеством электроэнергии. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2010. Вип. 4/2010 (63). С. 98–102.
- 56 Курись Л.В., Бялобржеський О.В. Схема тягового електротехнічного комплексу транспортного засобу з накопичувачем енергії. // Електротехніка та електроенергетика. 2015. № 1. С. 5–10.
- 57 Логинова Е.Ю., Коваленко А.В. Аккумуляторные накопители энергии на метропоездах. // Мир транспорта. 2014. № 1. С. 50–55.
- 58 Охотников Н.С. Повышение тяговых свойств электропоездов при помощи накопителей энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Охотников Николай Станиславович; Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. М., 2010. 24 с.
- 59 Охотников Н.С. Использование накопителей энергии для повышения тяговых свойств электропоездов. // Вестник ВНИИЖТ. М., 2010. № 5. С. 33–36.
- 60 Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Разработка энергосберегающих схем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока 3,3 кВ с использованием накопителей энергии. // Сборник научных трудов. Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта. М.: МГУПС (МИИТ), 1997. Вып. 916. С. 149–152.
- 61 Бродский Ю.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Стационарная система аккумуляции энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе емкостных накопителей энергии. // Электротехника. 2008. № 7. С. 38–41.

- 62 Родькин Д.Й., Величко Т.В. Особенности осуществления электропривода с накопителями энергии. // Вісник КДПУ. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчук: КДПУ. 2000. Вип. 2/2000 (9). С. 124–132.
- 63 Родькин Д.Й., Корнет В.Н. К теории электропривода с емкостным накопителем. // Вісник КДПУ. Наукові праці Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчук: КДПУ. 2000. Вип. 2/2000 (9). С. 149–151.
- 64 Хворост Н.В. Концепция новой структуры системы электрической тяги для метрополитена. // Коммунальное хозяйство городов. 2003. № 53. С. 172–179.
- 65 Хворост М.В., Божко В.В. Система електротягового забезпечення підвищеної ефективності для метрополітенів. // Електротехніка і електромеханіка. 2006. № 6. С. 79–86.
- 66 Хворост М.В. Розвиток наукових основ систем електричної тяги метрополітенів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.09 / Хворост Микола Васильович; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Д., 2011. 43 с.
- 67 Черняк Ю.В., Гаюр А.В., Ревчук М.О. Анализ повышения эффективности потребления электроэнергии на электропоездах путем установки накопителей энергии. // Збірник наукових праць ДЕТУТ: Серія «Транспортні системи і технології». К.: ДЕТУТ, 2012. Вип. 20. С. 142–144.
- 68 Щербак Я.В., Нерубацький В.П. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України. // Залізничний транспорт України. 2011. № 2. С. 30–34.
- 69 Омеляненко В.И., Омеляненко Г.В. Инерционный накопитель энергии для систем тягового электроснабжения. // Техническая электродинамика. 2002. № 4. С. 83–88.
- 70 Омеляненко Г.В. Электромеханический преобразователь энергии инерционного накопителя для сетей тягового электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Омеляненко Галина Викторовна; Харьковский гос. политехнический ун-т. Х., 1999. 169 с. Библиогр.: с. 158–168.
- 71 Омеляненко В.И., Бондаренко В.Е., Омеляненко Г.В., Оверьянова Л.В. Накопители энергии – перспективная технология для железных дорог. // Локомотив-інформ. 2011. № 4. С. 4–9.
- 72 Якунін Д.І. Електромеханічна система привода з лінійним двигуном для нахилу кузовів швидкісного рухомого складу: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.22.09 / Якунін Дмитро Ігоревич; Національний техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут». Х., 2010. 21 с.
- 73 Омеляненко В.И., Любарский Б.Г., Оверьянова Л.В., Рябов Е.С. Концептуальный проект пригородного электропоезда с инерционным накопителем энергии. // Локомотив-інформ. 2013. № 11. С. 6–11.
- 74 Оверьянова Л.В. Визначення параметрів та оцінка властивостей електромеханічних інерційних накопичувачів енергії для приміських електропоїздів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.09 / Оверьянова Лілія Вікторівна; Національний техн. ун-т «Харківський політехнічний інститут». Х., 2014. 20 с.
- 75 Омеляненко В.И., Оверьянова Л.В. Работа бортового электромеханического инерционного накопителя энергии в тяговом приводе пригородного электропоезда. // Залізничний транспорт України. 2015. № 1. С. 44–49.
- 76 Рябов Е.С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 6 (1115). С. 132–137.
- 77 Оверьянова Л.В., Омеляненко О.В., Новофастовский И.В. Моделирование работы электромеханического инерционного накопителя энергии в системе тягового привода при торможении электропоезда. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 18 (1127). С. 115–119.
- 78 Северин В.П., Оверьянова Л.В., Омеляненко О.В. Управление потоком мощности в тяговом приводе электропоезда при питании от контактной сети и инерционных накопителей энергии. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Х.: НТУ «ХПІ», 2015. № 58 (1167). С. 29–32.
- 79 Любарский Б.Г., Шайда В.П., Буряковский С.Г. Сравнительный анализ накопителей энергии для транспортных средств. // Залізничний транспорт України. 2015. № 6. С. 13–21.
- 80 Омеляненко В.И. Пригородный электропоезд с электромеханическим инерционным накопителем энергии. // Вестник ВЭЛНИИ. Новочеркасск, ОАО «ВЭЛНИИ». 2014. № 2(68). С. 89–102.
- 81 Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В., Холод О.И. Системы электроснабжения метрополитена с современными полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии. // Електротехніка і електромеханіка. Х.: НТУ «ХПІ», 2013. № 1. С. 41–49.

- 82 Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Энергия и мощность в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и накопителями энергии. // *Электротехника і електромеханіка*. Х.: НТУ «ХП», 2014. № 1. С. 45–57.
- 83 Сокол, Е.И., Жемеров Г.Г., Тугай Д.В. Силовая электроника и концепция энергетики «SMART GRID». // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2013. Спец. выпуск т.1, № 8 (114). С. 7–16.
- 84 Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В. Уменьшение потерь энергии в системах электроснабжения подвижного состава метрополитена при использовании энергоёмких накопителей электроэнергии. // *Технічна електродинаміка*. 2014. № 5. С. 137–138.
- 85 Тугай Д.В. Энергоэффективность интеллектуальных систем электропоставки с напівпровідниковими перетворювачами енергії: дис. ...док. техн. наук: 05.09.03 / Тугай Дмитро Васильович ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Х., 2017. 411 с. Библиогр.: с. 353–382.
- 86 Костин Н.А., Никитенко А.В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока. // *Залізничний транспорт України*. 2014. № 3. С. 15–23.
- 87 Муха А.М., Костін М.О., Куриленко О.Я., Ципля Г.В. Підвищення ефективності роботи електроприводу постійного струму на основі використання суперконденсаторних накопичувачів електроенергії. // *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ імені академіка Лазаряна*. 2017. 5(71). С. 48–60.
- 88 Саблін О.І., Босий Д.О., Кузнецов В.Г., Баб'як М.О., Косарев Є.М., Губський П.В. Эффективность рекуперации электроэнергии в системе электротранспорта с инверторными тяговыми подстанциями постоянного тока. // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. Вінниця, 2016. № 2. С. 72–78.
- 89 Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперации електроенергії в умовах метрополітену. // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Вип. 8 (72) / том 6/. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>
- 90 Саблін О.І., Кузнецов В.Г., Бондар О.І., Артемчук В.В. Моделирование взаимодействия электродвигателя с накопителем энергии в режиме рекуперации электроэнергии. // *Електрифікація транспорту*. 2014. № 7. С. 34–41.
- 91 Саблин О.И. Повышение эффективности рекуперации энергии в системе электротранспорта при ограниченном тяговом электропотреблении. // *Технологический аудит и резервы производства*. 2014. № 6/1(20). С. 21–26.
- 92 Кузнецов В.Г., Саблин О.И., Губский П.В., Кольхаев Е.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена. // *Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. Нац. гірничого ун-ту. Д.*, 2015. № 95. С. 68–73.
- 93 Нікітенко А.В., Костін М.О. Збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоїздах постійного струму. // *Залізничний транспорт України*. 2015. № 3. С. 25–31.
- 94 Саблін О.І. Оптимізація режимів тягового електроживлення та рекуперации енергії в системах електричного транспорту. // *Електрифікація транспорту*. 2016. № 11 С. 53–60.
- 95 Саблин О.И., Босый Д.А. Выбор рациональных энергообменных режимов работы накопителей энергии в системах тягового электроснабжения. // *Проблемы безопасности на транспорте: материалы VIII Международной научно-практической конференции*. Гомель, 2017. С. 145.
- 96 Саблін О.І., Босий Д.О., Кебал І.Ю., Мямлін С.С. Оптимізація енергообмінних режимів у системах тягового електропостачання під час застосування накопичувачів. // *Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації*. Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 12–13 квітня 2018 р. Кременчук, КрНУ, 2018. С. 107–114.
- 97 Саблін О.І. Розвиток методів і засобів підвищення ефективності використання енергії рекуперации в системі електричного транспорту : дис. ...док. техн. наук: 05.22.09 / Саблін Олег Ігорович ; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка Лазаряна. Д., 2018. 364 с. Библиогр.: с. 278–313.
- 98 Шевлюгин М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии : автореф. дис.... д-ра техн. наук : 05.09.03 / Шевлюгин Максим Валерьевич ; Моск. гос. ун-т путей сообщения. М., 2013. 49 с.
- 99 Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. // *НТТ – Наука и техника транспорта*. 2008. Вып. № 1. С. 15–20.
- 100 Шевлюгин М.В., Гречишников В.А. Эксплуатация накопителя энергии на метрополитене. // *Мир транспорта*. 2013. № 5. С. 54–58.

- 101 Шевлюгин М.В. Энергосберегающие схемы тягового электроснабжения железных дорог на базе сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии. // Электротехника. 2008. № 7. С. 28–34.
- 102 Шевлюгин М.В., Бадёр М.П., Бычкова М.П., Гричишников В.А. Возможность использования энергии BPS на базе аккумуляторных батарей GIGACELL в системе тягового электроснабжения Московского метрополитена. // Электроника и электрооборудование транспорта. 2010. № 5-6. С. 23–26.
- 103 Шевлюгин М.В. Снижение расхода энергии и рабочей мощности основного силового оборудования тяговых подстанций электрических железных дорог с помощью накопителей энергии : монография. М., 2007. 151 с.
- 104 Шевлюгин М.В. Энергосбережение на железнодорожном транспорте с помощью сверхпроводниковых индуктивных накопителей энергии. // НТТ – Наука и техника транспорта. 2008. № 2. С. 67–70.
- 105 Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Вильгельм А.С., Кващук В.А. Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения. // Локомотив. 2013. № 8. С. 5–8.
- 106 Черемисин В.Т., Никифоров М.М., Незевак В.Л. Выбор мест установки накопителей электроэнергии на полигоне постоянного тока по критерию энергоэффективности. // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. 2013. № 2(6). С. 48–52.
- 107 Черемисин В.Т., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Повышение энергетической эффективности системы тягового электроснабжения в условиях работы постов секционирования с накопителями электрической энергии. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. № 10. С. 54–64.
- 108 Вильгельм А.С. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на железных дорогах постоянного тока: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Вильгельм Александр Сергеевич ; Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2013. 20 с.
- 109 Nezevak V., Cheremisin V., Shatohin A. Evaluation of the energy efficiency of energy storage for electric rolling stock of railways DC. // International Journal of Advanced Railway. 2013. V. 1. № 2. P. 53–56.
- 110 Шатохин А.П. Разработка методов и средств повышения эффективности применения рекуперативного торможения на железных дорогах постоянного тока : дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07 / Шатохин Андрей Петрович ; Омский государственный университет путей сообщения. Омск, 2017. 187 с. Библиогр.: с. 159–175.
- 111 Незевак В.Л., Черемисин В.Т. Перспективы применения накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения постоянного тока. // Бюллетень результатов научных исследований. 2015. № 1(14). С. 76–83.
- 112 Штанг А.А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. / Штанг Александр Александрович ; Новосибир. гос. техн. ун-т. Новосибирск, 2006. 19 с.
- 113 Щуров Н.И., Щеглов К.В., Штанг А.А. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги. // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск, 2008. № 1(51). С. 99–104.
- 114 Штанг А.А., Спиридонов Е.А., Ярославцев М.В. Применение накопителей энергии в системах электроснабжения городского электрического транспорта. // Транспорт Российской Федерации. 2012. № 3–4 (40–41). С. 68–70.
- 115 Улитин В.Г. Проблема использования избыточной энергии рекуперации на городском электрическом транспорте. // Коммунальное хозяйство городов. 2009. № 88. С. 266–271.
- 116 Белозеров В.И., Степаненко В.П. Актуальность создания карьерных локомотивов с накопителем энергии. // Горная промышленность. 2014. № 4. С. 76.
- 117 Степаненко В.П. Применение комбинированных (гибридных) энергосиловых установок в горной промышленности. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 11. С. 322–328.
- 118 Степаненко В.П., Белозеров В.И., Сорин Л.Н. Перспективы применения комбинированных накопителей энергии на карьерном железнодорожном транспорте. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 5. С. 317–322.
- 119 Степаненко В.П., Сорин Л.Н. Актуальность ресурсо- и энергосбережения подземных рудничных локомотивов с комбинированными накопителями энергии. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 5. С. 323–328.
- 120 Степаненко В.П., Сорин Л.Н. Энергоэффективность подземной локомотивной откатки с гибридными накопителями энергии. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 6. С. 135–140.
- 121 Степаненко В.П. Применение возобновляемых источников энергии и суперконденсаторов на открытых горных работах. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 8. С. 175–182.

- 122 Domínguez M., Cucala A. P., Fernández A., Pecharrómán R. R., Blanquer J. Energy efficiency on train control: design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices. // 9th World Congress on Railway Research (22.05–26.05.2011). Madrid, 2011. P. 1–12. URL: http://www.vialibre-ffe.com/pdf/Dominguez_Maria.pdf. Назва з екрану. Перевірено 26.05.2016.
- 123 Li X., Lo H. K. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations. // *Transportation Research*. 2014. Part B (64). P. 73–89.
- 124 Yang X., Chen A., Li X., Tang T. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems. // *Transportation Research*. 2015. Part C (57). P. 13–29.
- 125 Szeląg A., Maciołek T., Drązek Z., Patoka M. Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej. // *Pojazdy szynowe. Kwartalnik naukowo-techniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji, budowy i badań taboru szynowego*. 2011. № 3. P. 34–42.
- 126 Allègre A.-L., Bouscayrol A., Delarue P., Barrade P., Chattot E., El-Fassi S. Energy storage system with supercapacitor for an innovative subway. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 57. Issue 12. 2010. P. 4001–4012.
- 127 Barrero R., Tackoen X., Van Mierlo J. Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network. // *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08*. IEEE. P. 1–8.
- 128 Barrero R., Tackoen X., Van Mierlo J. Energy saving in public transport: enhanced energy storage systems for improved on-board light rail vehicle efficiency. // *IEEE Vehicular Tech. Magazin*. 2008. № 3 (3). P. 26–36.
- 129 Pavel D., Lubos S. The energy storage system with supercapacitor for public transport. // *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09*. IEEE. P. 1826–1830.
- 130 Sevilla M., Mokaya R. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage. // *Energy & Environmental Science*. 2014. Vol. 7. № 4. P. 1250–1280.
- 131 Konarzewski M., Niezdova T., Stankiewicz M., Szurgott P. Hybrid locomotives overview of construction solutions. // *Journal of KONES Power train and Transport*. 2013. Vol. 20. № 1. P. 124–134.
- 132 Maruyama N. Stabilisierung der Fahrleitungsspannung mittels Schwungrad. // *Elektrische Bahnen*. 1992. (90). № 4. P. 125–129.
- 133 Moninger F. Инерционные накопители энергии в системах тягового электроснабжения. // *Железные дороги мира*. 2000. № 12. С. 41–43.
- 134 Negishi H. Аккумуляция энергии на железных дорогах. // *Железные дороги мира*. 2003. № 6. С. 55–59.
- 135 Rufer A., Hotellier D., Barrade P. Supercapacitor-based energy storage substation for voltage compensation in weak transportation networks. // *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2004. Vol. 19, № 2. P. 629–636.
- 136 Pulling N. Tram builders go to ground to find business. // *Tramways and Urban Transit*. 2009. 72, № 860. P. 300–303.
- 137 Czerwiński A., Obrębowski S., Rogulski Z. New high-energy lead-acid battery with reticulated vitreous carbon as a carrier and current collector. // *Journal of Power Sources*. 2012. № 198. P. 378–382.
- 138 Liu H., Jiang J. Flywheel energy storage—an upswing technology for energy sustainability. // *Energy and Buildings*. 2007. № 39 (5). P. 599–604.
- 139 Flynn M., McMullen P., Solis O. Saving energy using flywheels. // *IEEE Industry Applications Magazine*. 2008. № 14 (6). P. 69–76.
- 140 Iannuzzi D., Pagano E., Tricoli P. The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines. // *Energies*. 2013. № 6 (4). P. 1802–1820.
- 141 Ciccarelli F., Iannuzzi D., Lauria D. Stationary ultracapacitors storage device for improving energy saving and voltage profile of light transportation networks. // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2012. № 21 (1). P. 321–337.
- 142 Iannuzzi D., Lauria D., Tricoli P. Optimal design of stationary supercapacitors storage devices for light electrical transportation systems. // *Journal of Optimization and Engineering*. 2012. № 13 (4). P. 689–704.
- 143 Iannuzzi D., Tricoli P. Speed-based state-of-charge tracking control for metro trains with onboard supercapacitors. // *IEEE Trans. Power Electron*. 2012. № 27 (3-4). P. 2129–2140.
- 144 Shimada M., Oishi R., Araki D. Energy storage system for effective use of regenerative energy in electrified railways. // *Hitachi Review*. 2010. № 59 (1). P. 33–38.
- 145 Ciccarelli F., Iannuzzi D., Tricoli P. Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand. // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2012. № 24. P. 36–49.

- 146 Sekijima Y., Inui M., Monden Y., Aoyama I. Development of an energy storage system for DC electric rolling stock by applying electric double layer capacitors. // *Japanese Railway Engineering*. 2005. № 156. P. 35–41.
- 147 Ratniyomchai T., Hillmarsen S., Tricoli P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. // *The Institution of Engineering and Technology*. 2014. Vol. 4. № 1. P. 9–20.
- 148 Ratniyomchai T., Kulworawanichpong T. Demonstration project for installation of battery energy storage system in mass rapid transit. // Peer-review under responsibility of the scientific committee of the 2017 International Conference on alternative energy in developing countries and emerging economics. 2017, May 25-26, Bangkok, Thailand, P. 93–98.
- 149 Khodaparastan M., Mohamed Ahmad A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. // *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*. 2019. P. 1–17.
- 150 Gao Z., Fang J., Zhang Y., Sun D. Control strategy for wayside supercapacitor energy storage system in railway transit network. // *J. Mod. Power Clean Energy*. 2014. № 2 (2). P. 181–190.
- 151 Xia H., Chen H.X., Yang Z.P., Lin F., Wang B. Optimal energy management location and size for stationary energy storage system in a metro line based on genetic algorithm. // *Energies*. 2015. № 8. P. 11618–11640.
- 152 Hejiabady S., Tricoli P. Energy storage system for railway applications & analysis and modeling of electrochemical batteries for conductor rail DC Railway. // *Railway systems Engineering and Integration (University of Birmingham)*. 2013. 97 P.
- 153 Steiner M., Klohr M., Pagiela S. Energy storage systems with ultracaps on board of railway traction vehicles. // *Proc 12th Eur. Conf. Power Electronics and Applications. EPE 2007, Aalborg, Denmark, 2-5 Sept.* P. 1–10.
- 154 Kondo K. Recent energy saving technologies on railway traction systems. // *IEEJ Trans.* 2010. № 5. P. 298–303.
- 155 Szênâsy I. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. // *Acta Technica Jaurinensis*. 2009. Vol. 2. № 1. P. 117–131.
- 156 Ciccarelli F. Energy management and control strategies for the use of supercapacitors storage technologies in urban railway traction systems. // *PHD School in Industrial Engineering*. 2014. 329 P.
- 157 Su S. Evaluation of strategies to reducing traction energy consumption of metro systems using an optimal train control simulation model. // *Energies*. 2016. Vol. 9. No. 105. P. 1–19.
- 158 Sone S. Экономия энергии на рельсовом транспорте Японии. // *Железные дороги мира*. 2013. № 8. С. 47–53.
- 159 Lee H., Song J., Lee H.A., Jang G., Kim G. Capacity optimization of the supercapacitor energy storage on DC railway system using a railway power flow algorithm. // *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 2011. Vol. 7. No. 5(B). P. 2739–2753.
- 160 Chaviha N., Bohlin M., Campillo J., Dahlquist E. Review of application of energy storage devices in railway transportation. // *The 8th International Conference on Applied Energy (Energy Procedia)*. 2017. № 105. P. 4561–4568.
- 161 Wiczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. // *TTS Technika Transportu szynowego*. 2018. № 10. P. 39–43.
- 162 Mensah-Darkwa K., Zequine C., Kahol P.K., Gupta R.K. Supercapacitor energy storage device using biowastes: a sustainable approach to Green energy. // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. No. 414. P. 1–22.
- 163 Комунальне підприємство «Київський метрополітен» (офіційний сайт). URL: <http://www.metro.kiev.ua>. Назва з екрану. Перевірено 17.05.2017.
- 164 Сулим А.О., Мужичук С.О., Хозя П.О., Павленко Ю.С., Єжов Ю.В. Сучасний стан та перспективи розвитку рухомого складу метрополітену в Україні. // *Залізничний транспорт України*. 2019. № 3. С. 14–20. DOI: <http://doi.org/10.34029/2311-4061-2019-131-2-14-20>
- 165 Звіт про НДР «Дослідження стану несучих металоконструкцій кузовів вагонів метрополітену (серії Е та її модифікацій) з метою визначення їх залишкового ресурсу та продовження терміну експлуатації». Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2011. 145 с.
- 166 Звіт про НДР «Розробка нормативно-технічної документації технічного діагностування вагонів метрополітену серії 81-717/714 та її модифікацій». Кременчук: ДП «УкрНДІВ», 2018. 138 с.
- 167 Донченко А.В., Мужичук С.О., Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ». // *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук, 2015. Вип. 12. С. 48–56.
- 168 Донченко А.В., Сулим А.О., Сіора О.С., Мельник О.О., Федоров В.В. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену. // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп.* 2016. № 3(63). С. 108–119.

- 169 Гладких І.В., Сулим А.О. Інновації від Innotrans. Аналітичний огляд. // Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». Кременчук, 2018. Вип. 17. С. 87–101.
- 170 Клинов В.Ю., Бродский Ю.А., Подаруев А.И., Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В. Емкостные накопители в системе электроснабжения метрополитена. // Русский инженер. 2008. № 2 (17). С. 62–64.
- 171 Сулим А.А. Обоснование места установки емкостных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения метрополитена. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2013. Вип. 2/2013 (22). Частина 2. С. 282–285.
- 172 Sulym A. Determination of rational placement for energy storages in the power supply system of the underground. Metallurgical and mining industry. 2016. № 10. P. 24–30.
- 173 Таназлы Г.И., Мунасыпов Р.А. Проектирование сложных систем заряда емкостных накопителей энергии. // Вестник УГАТУ. Уфа, 2012. Вып. № 1 (46). Т. 16. С. 133–142.
- 174 Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. М.: Транспорт, 2005. 464 с.
- 175 Пантегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. К.: Наукова думка, 1982. 424 с.
- 176 Патент на полезную модель 53826 Российская Федерация, МПК H02K15/00. Зарядное устройство для емкостного накопителя энергии / Пупынин В.Н., Шевлюгин М.В.; патентообладатель: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ). № 2005140178/22; заявка 23.12.2005; опубл. 27.05.2006, Бюл. № 15. 6 с.
- 177 Никитин В.В., Середа Е.Г. Определение параметров преобразователя для использования сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии в составе электрической установки автономного локомотива. // Известия ПГУПС. 2011. № 1. С. 80–91.
- 178 Афанасов А.М., Арпуль С.В., Мясников А.С. Анализ режимов пуска автономного электропоезда при питании тягового электропривода от ионистора. // Електрифікація транспорту. 2015. № 10. С. 38–43.
- 179 Афанасов А.М., Арпуль С.В., Демчук Р.Н. Пусковые режимы автономного электропоезда с бортовым накопителем энергии. // Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2016. № 11. С. 18–23.
- 180 Патент 2436690 Российская Федерация, МПК B60L 7/12 Способ движения электрического транспортного средства на рекуперированной электроэнергии и устройство для его осуществления / Лиманский С.С.: заявитель и патентообладатель Лиманский С.С. № 2010104636/11; заявка 11.02.2010; опубл. 20.12.11. Бюл. № 35. 18 с.
- 181 Елисеев А.Д., Фурсов С.А. Суперконденсаторы Nesscar повышают энергоэффективность приводов. Электронные компоненты. 2015. № 2. С. 84–87.
- 182 Гаврилов Я.И., Мнацаканов В.А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. М.: Транспорт, 1986. 229 с.
- 183 Сычев С.Д. Разработка программного обеспечения для измерительных комплексов на базе персонального компьютера. // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. 2007. Вип. 15. С. 131 – 134.
- 184 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 16669. Програмний комплекс для збору, відображення, запису та подальшої математичної обробки даних з аналого-цифрових перетворювачів у комп'ютеризованих вимірювальних комплексах («ЕЛЕКТРО») / Автор Сичов С.Д., авторські майнові права належать Сичов С.Д., ДП «УкрНДІВ», дата реєстрації 19.05.2006
- 185 Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.А. Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович и др. М.: Издательский центр «Академия». 2006. 464 с.
- 186 Сулим А.А. Повышение эффективности энергообеспечения подвижного состава метрополитена с системами рекуперации путем применения емкостных накопителей энергии: дис... канд. техн. наук: 05.22.07 / Сулим Андрей Александрович; Гос. предприятие «Гос. научн. иссл. центр ж.-д. трансп. Украины». Киев, 2015. 188 с. Библиогр.: с. 150–163.
- 187 Сулим А.А., Сычев С.Д., Распопин В.Р., Хозя П.А., Мельник А.А., Федоров В.В. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена. // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 28-29 березня 2012 р. Кременчук, КрНУ, 2012. С. 344.
- 188 Сулим А.О., Мужичук С.О., Хозя П.О., Мельник О.О., Федоров В.В. Дослідження енергообмінних процесів під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперативності. // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2017. №5 (71). С. 28–47. DOI: <http://doi.org/10.15802/stp2017/112934>

- 189 Сулим А.О., Мужичук С.О., Третяк Е.В., Хозя П.О., Мельник О.О. Оцінка резервів енергозабезпечення під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2019. Вип. 3 (47). С. 66–77. DOI: <http://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.3.47.66-77>
- 190 Говорин Е.В. Статистические методы планирования эксперимента в металлургии. М.: Металлургия, 1992. 350 с.
- 191 Пальоха К.К. Організація і проведення експерименту : навч. посібник для студентів спеціальності «Композиційні та порошкові матеріали, покриття». К.: ІЗИН, 1996. 136 с.
- 192 Родькин Д.Й., Бялобржеский А.В., Кривонос С.А., Ломонос А.И. Накопители-компенсаторы в системах динамического нагружения. // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Збірка наукових праць. Тематичний випуск 63. Харків, ХДПУ, 2001. С. 279–281.
- 193 Ломонос А.И., Бялобржеский А.В., Горбань С.Н. Параметры оборудования систем динамического нагружения с накопителями-компенсаторами // Вісник КДПУ. Кременчук, 2004. Вип. № 2/2004 (25). С. 126–130.
- 194 Алексеев Б.А. Применение накопителей в электроэнергетике. // Електро. 2005. № 1. С. 42–46.
- 195 Teymourfar R., Asaei B., Iman-Eini H., Nejati fard R. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line. // Energy Conversion and Management. 2012. Vol. 56. P. 206–214.
- 196 Сулим А.А., Хозя П.А. Обоснование необходимости использования емкостных накопителей энергии на подвижном составе метрополитена. // Modern Science–Moderní věda. Praha, Česká Republika, 2017. №7. С. 9–19.
- 197 Рыбалко А.Я., Дыбрин С.В. Критерии сопоставления накопителей энергии. // Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. 2005. № 75. С. 56–61.
- 198 Fomin O., Sulym A., Kulbovskiy I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. Issue 2 (92). P. 63–71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080
- 199 Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О. Застосування бортових ємнісних накопичувачів незначної потужності та енергоємності на рухомому складі метрополітену. // Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту імені В. Даля. Вип. 4 (260). 2020. С. 87-92. DOI: 10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92
- 200 Евстафьев А.М. Оценка энергоёмкости бортового накопителя для тягового подвижного состава. Бюллетень результатов научных исследований ПГУПС. 2008. № 2. С. 7–15.
- 201 Рыбалко А.Я., Дыбрин С.В. Выбор ёмкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2008. № 8. С. 356–361.
- 202 Сулим А.А., Доченко А.В., Гончаров А.М., Хозя П.А., Мужичук С.А. Определение параметров бортового накопителя электроэнергии при заданном режиме ведения подвижного состава метрополитена. // Залізничний транспорт України. 2016. № 3–4. С. 73–83.
- 203 Сулим А.О., Хозя П.О., Устенко О.В., Ломонос А.И. Параметры бортового накопичувача енергії для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Кременчук: КрНУ, 2016. Вип. 3 (35). С. 65–74.
- 204 Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О., Сіора О.С., Шамаков С.В. Визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії з урахуванням заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену. // Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». Кременчук. ДП «УкрНДІВ», 2016. Вип. 13. С.27–35.
- 205 Сулим А.О. Розробка підходу з визначення параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії рухомого складу метрополітену. // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. Северодонецьк, 2017. Вип. 3 (233). С. 201–208.
- 206 Fomin O., Sulym A., Khozia P., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on board capacitive energy storage of the rolling stock. // Naukovyi Visnyk NHRU. Dnipro, 2018. № 5 (167). P. 79-87. DOI: <http://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
- 207 Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Том первый. Л.: Энергоиздат, 1981. 534 с.
- 208 Мятаж А.В., Ярославцев М.В. Определение энергоёмкости бортового буферного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта. Транспорт Российской Федерации. Электроснабжение и электротехника. 2013. № 4 (47). С. 62–65.

- 209 Сулим А.А., Сиора А.С., Хозя П.А. Программное обеспечение для автоматизации расчетов электроэнергии рекуперации электрифицированного городского транспорта. // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ, 2014. Вип. 4/2014 (28). С. 105–112.
- 210 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 57508. Комп'ютерна програма «Рекуперация енергії») / автори: Сиора О.С., Сулим А.О., Хозя П.О., авторські майнові права належать ДП «УкрНДІВ», дата реєстрації 03.12.2014.
- 211 Теория электрической тяги / Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н., Озеров М.И. М.: Транспорт, 1995. 294 с.
- 212 Байрыева Л.С., Прокопович А.В. Теория электрической тяги : методическое пособие. М.: Издательство МЭИ, 2004. 40 с.
- 213 СОУ МПП 45.060-253:2008 Вагони метрополітену. Загальні технічні вимоги. К.: Міністерство промислової політики України, 2008. 29 с.
- 214 Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Stamatii V. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Iss. 3 (102). P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
- 215 Yatsko S., Sytnik B., Vashchenko Y., Sidorenko A., Liubarskyi B., Veretennikov I., Glebova M. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Issue 1 (97). P. 48–57. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.154520>.
- 216 Оптимизация управления движением поездов / Баранов Л.А., Ерофеев Е.В., Мелешин И.С., Чинь Л.М. : под ред. доктора технических наук Л.А. Баранова. М.: МИИТ, 2011. 164 с.
- 217 Сулим А.О., Хозя П.О. Математична модель руху поїзда метрополітену. // *International Scientific and Practical Conference. Prospects for the development of technical sciences in EU countries and Ukraine* (Влоцлавек, 21-22 грудня 2018 р.). Влоцлавек, Республіка Польща, 2018. С. 77-80.
- 218 Сулим А.О., Сиора О.С., Хозя П.О., Мельник О.О. Програмне забезпечення для моделювання руху поїзда метрополітену. // *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2019. Вип. 34. С. 182–198. DOI: <http://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-2-2>
- 219 Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 66286. Комп'ютерна програма «Motion Simulation» / автори: Сиора О.С., Мельник О.О., Сулим А.О., авторські майнові права належать ДП «УкрНДІВ», дата реєстрації 24.06.2016.
- 220 Палант О.Ю., Стаматін В.В. Огляд наявних і перспективних систем автоведення поїздів метрополітену. // *Проблеми економіки*. 2019. № 2(40). С. 119–125. DOI: <https://doi.org/10.32983/2222-0712-2019-2-119-125>
- 221 Мелешин И.С. Как сэкономить на тягу. // *Энергоэффективность и энергосбережение*. 2013. № 7-8. С. 65–67.
- 222 Сулим А.О., Сиора О.С., Мельник О.О., Хозя П.О., Третяк Е.В. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену. // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. 2020. №5(261). С. 57–66. DOI: <http://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-261-5-57-66>
- 223 Сулим А.О. Багатокритеріальний підхід до обґрунтування вибору раціональних параметрів ємнісного накопичувача для поїзда метрополітену. // *International scientific conference "New development areas of digitalization at the beginning the third millennium"*. December 10-11, 2021. Riga, Latvia. P. 50-54. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-172-5-13>
- 224 Звіт про НДР «Науково-експериментальні дослідження технічних характеристик вагонів метро, виготовлених в рамках комплексної модернізації для Комунального підприємства «Київський метрополітен». Випробування електрообладнання, випробування на електромагнітну сумісність з пристроями сигналізації та зв'язку, тягово-енергетичні випробування, випробування системи автоматичного регулювання швидкості, випробування з визначення параметрів мікроклімату в кабіні управління та рівнів шуму й інфразвуку вагонів метро» (ДР 0114U006350) / ДП «УкрНДІВ»; Хозя Павло Олександрович; викон. Донченко А.В., Речкалов С.Д., Шмаков С.В. [та ін.]. Кременчук, 2014. 154 с.
- 225 ТУ У 30.2-05763814-111:2014 Вагони метрополітену моделей 81-7080 та 81-7081. Комплексна модернізація з впровадженням асинхронного тягового приводу. Технічні умови. 2014. 95 с.

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут
вагонобудування»
(ДП «УкрНДІВ»)

А.О. Сулим

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ ПОЇЗДІВ МЕТРОПОЛІТЕНУ
ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ БОРТОВИХ ЄМНІСНИХ
НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

*Рекомендовано до друку науково-технічною радою
Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»
(протокол № 2 від 28.12.2022 р.)*

Формат паперу 60x84¹/₈, Тираж 100 прим.

*Видавництво ДП «УкрНДІВ»
Адреса редакції видавництва:
вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, Полтавської обл., 39621
www.ukrndiv.com.ua*

*Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації
серії КВ № 23892-13732Р від 19.04.2019 р.,
видане Державною реєстраційною службою України*

*ДП «УкрНДІВ», 2023. 105 с.
ISBN 978-966-97716-8-1*