

Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О.

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ БОРТОВОГО ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ

В статті запропоновано розвинути теорію з вибору раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену шляхом застосування багатокритеріальних методів оцінки з використанням програмних засобів. Описано суть та поетапні алгоритми двох методів оцінки раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії з використанням програмних засобів «Motion Simulation» та «Rational Trajectory». Визначено раціональну потужність та енергоємність бортового ємнісного накопичувача енергії, масогабаритні показники систем накопичення з цими накопичувачами під час застосування зазначених методів для однакових заданих умов (тип рухомого складу метрополітену, досліджувана ділянка колії, тип конденсаторних модулів). Встановлено, що завдяки впровадженню в систему керування рухомого складу метрополітену програмного засобу «Rational Trajectory» можливо досягти заощаджень на рівні 11% електроенергії, що витрачається на тягу. Визначено для заданих умов експлуатації шляхом використання зазначених методів величини заощаджень електроенергії за рахунок впровадження систем накопичення з раціональними параметрами бортових ємнісних накопичувачів енергії. Встановлено метод оцінки, який рекомендовано до застосування у подальшому під час необхідності визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії для рухомого складу метрополітену.

Ключові слова: електроенергія, ємнісний накопичувач енергії, заощадження, метод, метрополітен, програмний засіб, рухомий склад.

Актуальність дослідження. Метрополітен – складний комплекс надземних і підземних інженерно-технічних споруд, мереж і комунікацій, насичених енергетичними, механічними, інтелектуальними пристроями для руху поїздів. Метрополітен відноситься до переліку стратегічних об'єктів, які мають важливе значення для економіки і безпеки держави. Щодня найшвидшим і найбезпечнішим видом громадського транспорту користується майже 1,8 млн. пасажирів [1]. На разі вітчизняні метрополітени постійно розвиваються та розширюють свою мережу і інфраструктуру.

Постановка проблеми. Водночас вітчизняні метрополітени є одними з найбільш енергоємних підприємств, які володіють високим потенціалом з енергозбереження. Відомо, що значна частина споживання електроенергії приходить на тягу рухомого складу (близько 70 %) [2–4]. На даний час основним типом рухомого складу в метрополітенах України є вагони серії Є, вагони моделей 81.717/714 та їх модифікації виробництва 60–90 років минулого століття. Левова їх частка продовжує експлуатуватись з вичерпаним терміном служби, встановленим заводом-виробником. Сучасний інноваційний рухомий склад в інвентарному парку вітчизняних метрополітенів складає невелику частку і представлений модернізованими та новими вагонами виробництва ПАТ «КВБЗ». Тому, дослідження, направлені на заощадження електроенергії в метрополітені шляхом введення в експлуатацію інноваційного енергоефективного рухомого складу метрополітену, є перспективними і актуальними.

Теоретичний аналіз досліджень. За результатами аналізу робіт [2–7] відомо, що основними напрямками енергозбереження на рухомому складі метрополітену є впровадження інтелектуальних систем керування поїздом, ефективного тягового обладнання, а також підвищення ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування шляхом застосування накопичувачів енергії. За оцінками спеціалістів існують резерви заощадження електроенергії на рівні 10–40 % від того об'єму, що споживається рухомим складом на тягу, за рахунок впровадження вищезазначених заходів [2, 4, 6].

В цій статті пропонується зосередитись саме в напрямку ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену шляхом застосування систем накопичення, оскільки потенціал енергозбереження завдяки впровадженню цього заходу найбільший [2–7]. Проблемні питання з впровадження систем накопичення порушувались в роботах багатьох дослідників. У своїх роботах автори приділяли багато уваги вибору типу накопичувача, силового перетворювача для керування енергообмінними процесами на рухомому складі, раціонального місця розташування накопичувачів в системі енергозабезпечення тощо [2–10]. За результатами цих досліджень встановлено, що доцільним є застосування бортових систем накопичення, в основі яких застосовано ємнісні накопичувачі енергії (ЄНЕ) та статичні реверсивні перетворювачі енергії регульованого типу. Узагальнений аналіз досліджень [2, 5, 11, 12] дозволив встановити, що одним з актуальних та недостатньо розглянутих питань за умов застосування цих бортових систем на рухомому складі метрополітену, є визначення параметрів бортового ЄНЕ. Слід зазначити, що від вибору параметрів бортового

ЄНЕ напряду залежать такі показники як динаміка руху складу, рівень заощадження енергоресурсів та власне термін окупності цих бортових систем накопичення. Тому, це питання залишається актуальним та потребує подальшого розвитку.

Методи з визначення параметрів бортового ЄНЕ для рухомого складу умовно можливо розділити на дві групи: з використанням теоретичних та експериментально-розрахункових досліджень. В роботах [13, 14] визначати параметри бортового ЄНЕ запропоновано за аналізом динаміки споживання та рекуперації електроенергії рухомим складом. В наявних дослідженнях [6, 7, 15, 16] запропоновано визначати параметри бортового ЄНЕ за оцінкою кількості кінетичної енергії рухомого складу шляхом аналізу залежності кількості електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу від швидкості гальмування. В роботі [17] запропоновано визначати параметри бортового ЄНЕ за тяговими і гальмівними характеристиками складу з урахуванням обмеження споживання струму з контактної мережі. У дослідженнях [11, 18] параметри бортового ЄНЕ запропоновано визначати шляхом використання основних положень теорії імовірності за аналізом характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування. В роботі [19] підхід заснований на застосуванні теоретичних методів досліджень шляхом проведення чисельних розрахунків з використанням основ електричної тяги та електротехніки. В дослідженнях [12, 20, 21] пропонується обирати раціональні параметри бортового ЄНЕ з використанням даних експериментальних досліджень за критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення, а також за двома критеріями - обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення. В дослідженнях [22–24] визначати параметри бортового ЄНЕ запропоновано здійснювати шляхом проведення теоретичних досліджень за допомогою спеціалізованих програмних засобів. Так, в роботі [22] параметри бортового ЄНЕ визначають за середніми значеннями потужності та кількості електроенергії рекуперації за один робочий цикл; в праці [23] за двома критеріями: за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення; у роботі [24] за трьома критеріями: за масою, об'ємом та мінімальним терміном окупності системи накопичення.

За результатами аналізу існуючих методів щодо визначення параметрів бортового ЄНЕ для рухомого складу [6, 7, 11, 12, 13–24] встановлено наступне:

- найбільш простими є методи, за яких застосовується потужний та енергоємний накопичувач, здатний зберігати та повторно використовувати повний об'єм електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу під час заданих умов його експлуатації. Основним факторами, що стримують впровадження таких технічних рішень є вартісні та масогабаритні показники систем накопичення;
- з техніко-економічної точки зору, а також з урахування технологічних можливостей сьогодення, на рухомому складі доцільним є застосування бортового ЄНЕ незначної потужності та енергоємності;
- існують методи, які дозволяють швидко отримати результат щодо визначення параметрів бортових ЄНЕ та не потребують проведення складних і тривалих досліджень, однак вони не дозволяють враховувати різні фактори реальних умов експлуатації рухомого складу;
- методи, які засновані на використанні даних експериментальних досліджень, потребують значних фінансових ресурсів та часу, проте вони дозволяють враховувати реальні умови експлуатації рухомого складу;
- на разі найбільший розвиток отримали методи, в яких здійснюється вибір раціональних параметрів бортових ЄНЕ з використанням теоретичних досліджень за допомогою спеціалізованих програмних засобів. Ці програмні засоби дозволяють з достатньою точністю відтворювати процеси реальної експлуатації рухомого складу і значно зекономити фінансові ресурси та зменшити витрати часу на проведення таких досліджень.

Таким чином, виникає потреба продовження та подальшого розвитку досліджень з визначення і обґрунтування раціональних параметрів бортових ЄНЕ для рухомого складу метрополітену шляхом використання програмних засобів.

Мета статті – обрати раціональні параметри бортових ЄНЕ для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену з використанням теоретичних досліджень за допомогою програмних засобів.

Задачі дослідження. В цій статті запропоновано розвинути дослідження з вибору раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену шляхом застосування багатокритеріальних методів з використанням програмних засобів. Вибір раціональних параметрів бортового ЄНЕ пропонується виконати з застосуванням двох методів для однакових заданих умов експлуатації і типу рухомого складу та подальшого порівняння отриманих результатів між собою.

Суть першого методу полягає у визначенні раціональних параметрів за двома критеріями - обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення. При цьому для моделювання руху складу на заданій ділянці під час заданих режимів його ведення використовується програмний засіб «Motion Simulation», який дозволяє з достатньою точністю замінити експериментальні дослідження. Програмний засіб «Motion Simulation» розроблений в середовищі графічного програмування LabVIEW. Можливості програмного засобу, вхідні задані, проміжні та результуючі параметри, а також інструкцію роботи з цим програмним засобом детально розглянуто в роботі [25]. Зовнішній вигляд графічного інтерфейсу оператора програми «Motion Simulation», зображено на рис. 1. 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.

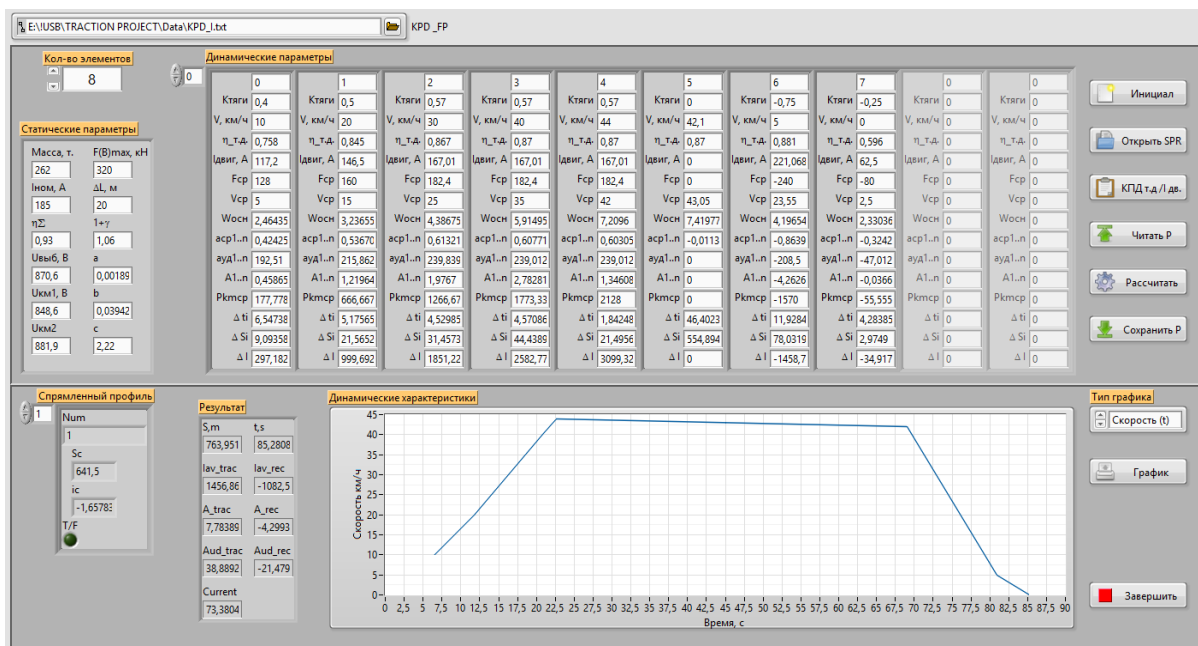


Рисунок 1 – Загальний вигляд інтерфейсу програмного засобу «Motion Simulation»

Перший метод вибору раціональних параметрів бортового ЄНЕ передбачає проведення такої поетапної процедури досліджень:

- 1) вибір ділянки експлуатації та моделі поїзда метрополітену з системами рекуперації (тягова характеристика);
- 2) виконання тягових розрахунків (визначення масових обмежень для системи накопичення);
- 3) визначення типових штатних умов ведення поїзда на заданій ділянці колії;
- 4) моделювання руху поїзда метрополітену та енергетичних процесів під час типових штатних умов ведення за допомогою розробленої програми «Motion Simulation» на заданій ділянці колії;
- 5) обробка даних комп'ютерного моделювання, за результатами якого визначаються максимальні значення потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування поїзда;
- 6) вибір параметрів бортових ЄНЕ (потужності та енергоємності) з урахуванням отриманих обмежень;
- 7) визначення вартості обраних систем накопичення з урахуванням витрат за їх життєвий цикл;
- 8) дослідження кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення;
- 9) побудова діаграм терміну окупності обраних систем накопичення;
- 10) визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ (потужності та енергоємності) за результатами аналізу діаграм терміну окупності.

Суть другого багатокритеріального методу полягає у визначенні раціональних параметрів бортового ЄНЕ відразу за трьома критеріями - обмеженням за масою, об'ємом та мінімальним терміном окупності системи накопичення. В якості головного критерію обрано мінімальний термін окупності системи накопичення, на інші критерії – масу та об'єм системи накопичення встановлюються обмеження з урахуванням технічних характеристик поїзда. В основі методу покладено використання програмного засобу «Rational Trajectory», здатного визначати раціональні режими ведення електрорухомого складу на заданій ділянці колії за критеріями заданого часу руху та мінімального споживання електроенергії з контактної мережі. Програмний засіб «Rational Trajectory» також розроблений в середовищі графічного програмування LabVIEW. Можливості програмного засобу, вхідні задані, проміжні та результуючі параметри, а також інструкцію роботи з цим програмним засобом детально розглянуто в роботі [26]. Зовнішній вигляд графічного інтерфейсу оператора програмного засобу «Rational Trajectory», зображено на рис. 2. 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 програмного засобу «Rational Trajectory» завжди відкривається вкладка вхідні параметри, де оператор має змогу ввести всі необхідні для розрахунку дані та скористатись підпрограмою «Спряччєння» (етапи 1–4). Функціональне призначення інших двох вкладок – це відображення проміжних (етапи 5–7) та кінцевих результатів розрахунку (етап 8).

Другий метод вибору раціональних параметрів бортового ЄНЕ передбачає проведення такої поетапної процедури досліджень:

- 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 програмного засобу «Rational Trajectory», 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 СНЕ 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 за їх життєвий цикл;
- 9) дослідження кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем накопичення;
- 10) побудова діаграм терміну окупності обраних систем накопичення;
- 11) визначення раціональних параметрів бортового СНЕ (потужності та енергоємності) за результатами аналізу діаграм терміну окупності.

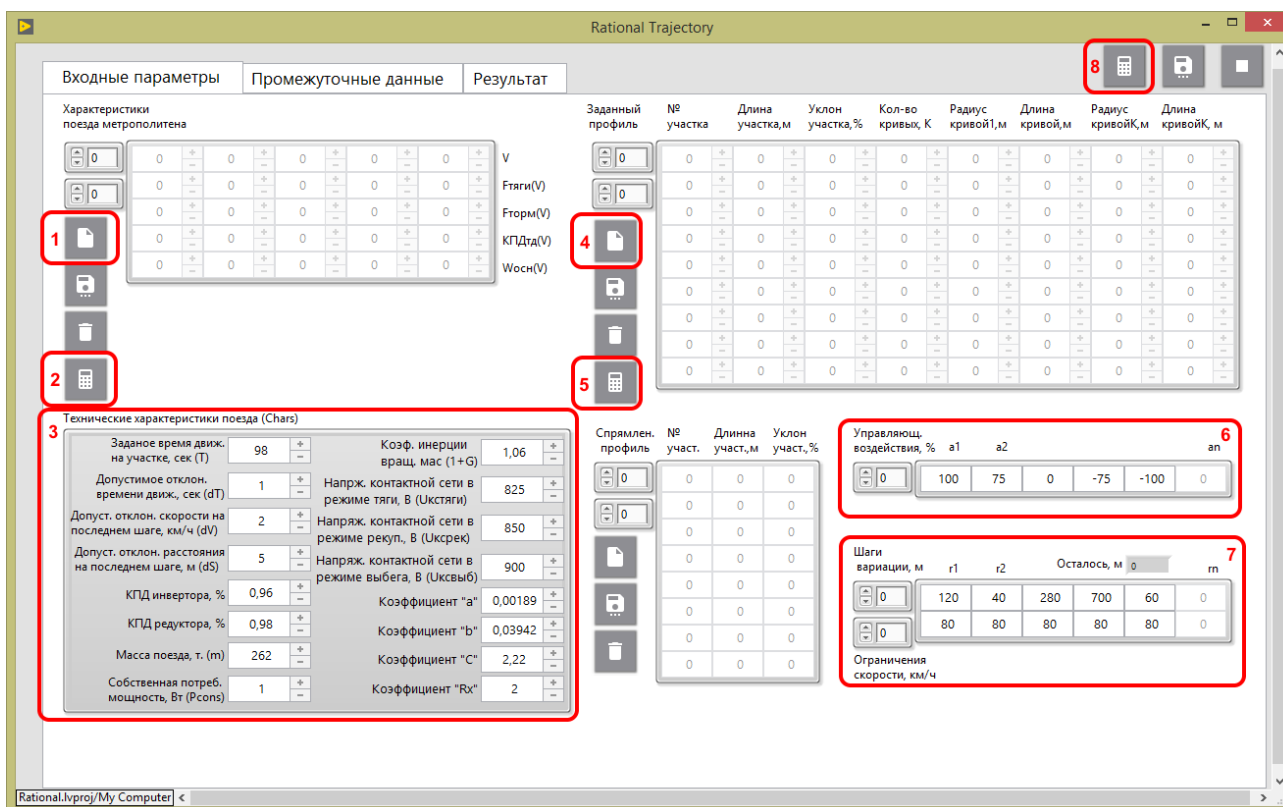


Рисунок 2 – Загальний вигляд інтерфейсу програмного засобу «Rational Trajectory»

Узагальнений математичний опис цільової функції багатокритеріальних методів визначення раціональних параметрів бортового СНЕ можна представити у наступному вигляді:

$$F(\bar{X}) \rightarrow \text{extremum}, \bar{X} \in D_1 \dots D_k \quad (1)$$

де $F(\bar{X})$ – головний критерій оптимальності; D – область можливих рішень, яка визначається границями відповідних значень (параметричні обмеження); k – кількість прийнятих обмежень для пошуку оптимального рішення.

З урахуванням обраного головного критерію формулювання задачі оптимізації: знайти такі значення потужності та енергоємності бортового СНЕ ($P_{\text{СНЕ}}$, $A_{\text{СНЕ}}$), за яких:

$$T_{\text{ок}} = F(P_{\text{СНЕ}}, A_{\text{СНЕ}}) \rightarrow \min. \quad (2)$$

Причому для цільової функції були встановлені такі граничні значення параметрів:

– метод з використанням програмного засобу «Motion Simulation»: $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots P_{\Delta m}]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots A_{\Delta m}]$, $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots P_{\text{max}}]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots A_{\text{рекmax}}]$, де $P_{\Delta m}$, $A_{\Delta m}$ – максимальні значення потужності та енергоємності за масою, які залежать від типу рухомого складу метрополітену з системами рекуперації та конденсаторних модулів; P_{max} , $A_{\text{рекmax}}$ – максимальні значення потужності та кількості електроенергії рекуперації для заданих штатних умов експлуатації рухомого складу;

– метод з використанням програмного засобу «Rational Trajectory»: $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots P_{\Delta m}]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots A_{\Delta m}]$, $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots P_{\Delta v}]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots A_{\Delta v}]$, $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots P_{\text{max}}]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots A_{\text{рекmax}}]$,

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, тобто:

$$\alpha = \begin{pmatrix} T_{ок1} \\ T_{ок2} \\ \\ T_{окj} \end{pmatrix} \rightarrow \max. \quad (3)$$

Отже, етапи першого та другого багатокритеріальних методів практично аналогічні. Основною відмінністю, порівнюючи перший з другим методом, є відсутність третього етапу та використання програмного засобу «Motion Simulation» замість «Rational Trajectory».

Для вищезазначених багатокритеріальних методів оцінки на основі теоретичних досліджень з використанням програмних засобів «Motion Simulation» та «Rational Trajectory» визначено параметри бортового ЄНЕ для однакових заданих умов експлуатації рухомого складу метрополітену. При цьому в якості рухомого складу метрополітену обрано модернізований п'ятивагонний поїзд з асинхронним приводом та системами рекуперації, в якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні (рис. 3).



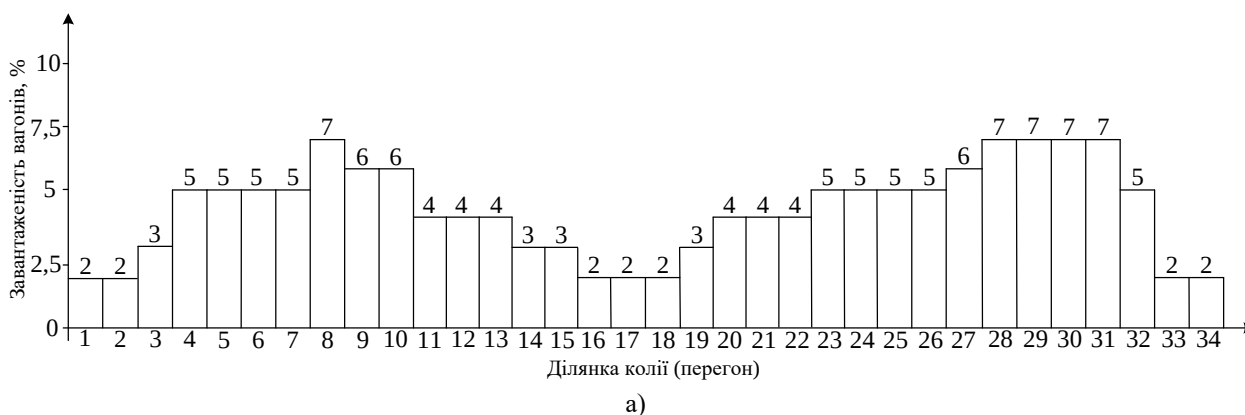
Рисунок 3 – Дослідний рухомий склад

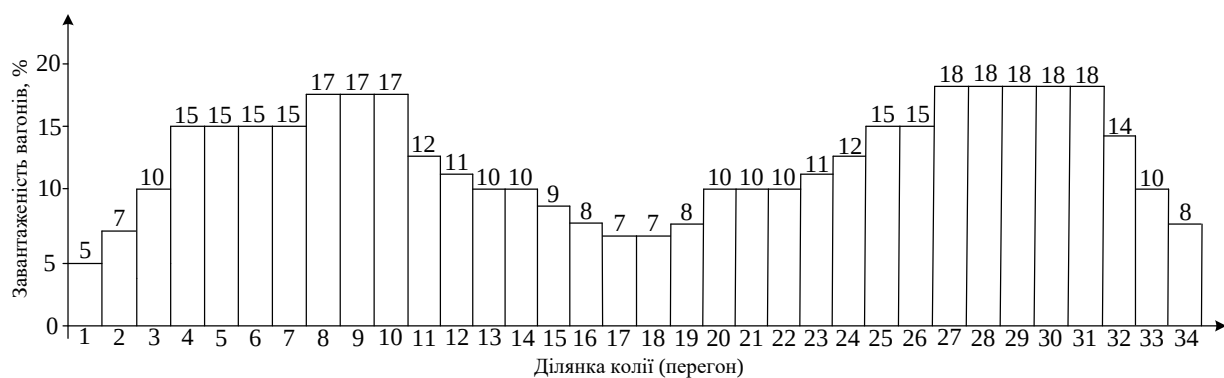
Параметри тягових асинхронних двигунів (ТАД), що встановлені на дослідному поїзді метрополітену, наступні: $P_n = 150$ кВт; $U_n = 610$ В; $I_n = 185$ А; $n_n = 1900$ об/хв; $f_n = 65$ Гц; $M = 2,21$ кН · м. Параметри тягової передачі та поїзда метрополітену: $D = 0,825$ м; $\eta_{ред} = 0,975$; $\mu = 6,95$; $m = 238,7$ т (номінальне завантаження); $G_{зч} = 1,44$ кН; $(1+\gamma) = 1,06$; $a = 1,2$ м/с².

В якості дослідної обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен».

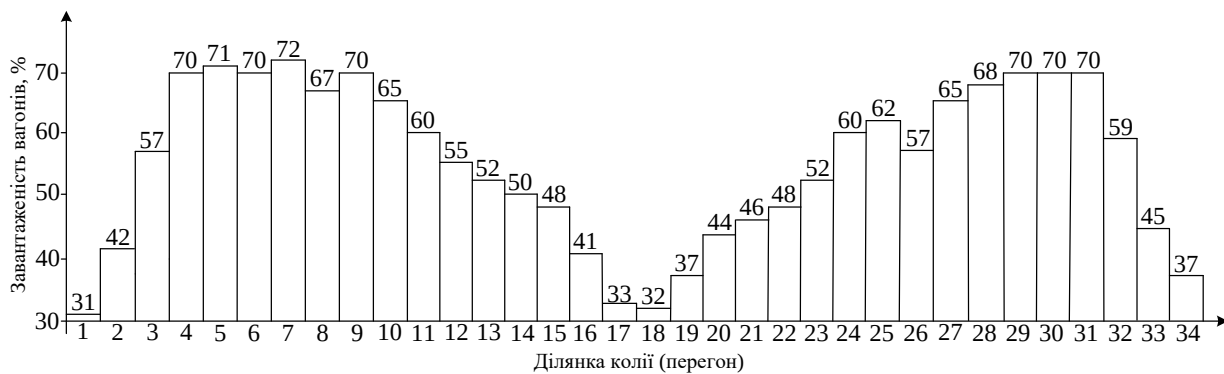
За результатами тягових розрахунків, виконаних за формулами, що наведені в роботах [21, 23, 27] визначено, що маса системи накопичення для обраного типу поїзда не повинна перевищувати 7,86 т відповідно до вимог динамічних якостей розгону поїзда [28]. За результатами аналізу технічної документації [29] на вагони метрополітену моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01 встановлено обмеження за об'ємом 1,5 м³ для системи накопичення.

Дослідження виконано за штатних типових штатних умов експлуатації поїзда з системами рекуперації протягом доби за «піковим» та «непіковим» графіками руху. Моніторинг завантаженості поїзда виконано фахівцями КП «Київський метрополітен» у період з 24 по 30 листопада 2019 року під час реальних умов його експлуатації. Результати моніторингу завантаженості поїзда протягом доби у робочі та вихідні дні під час «пікового» і «непікового» графіків руху залежно від перегону, зображено на рис. 4–6.

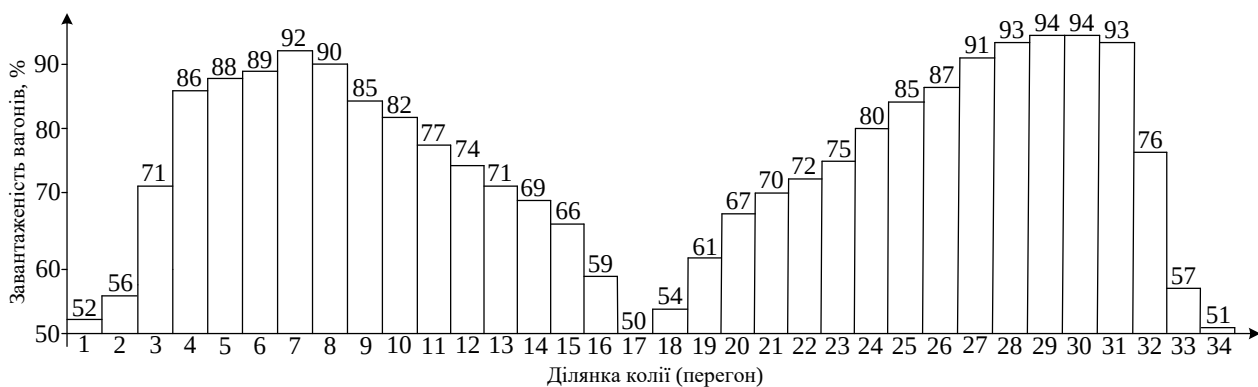




б)



в)



г)

Рисунок 4 – 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

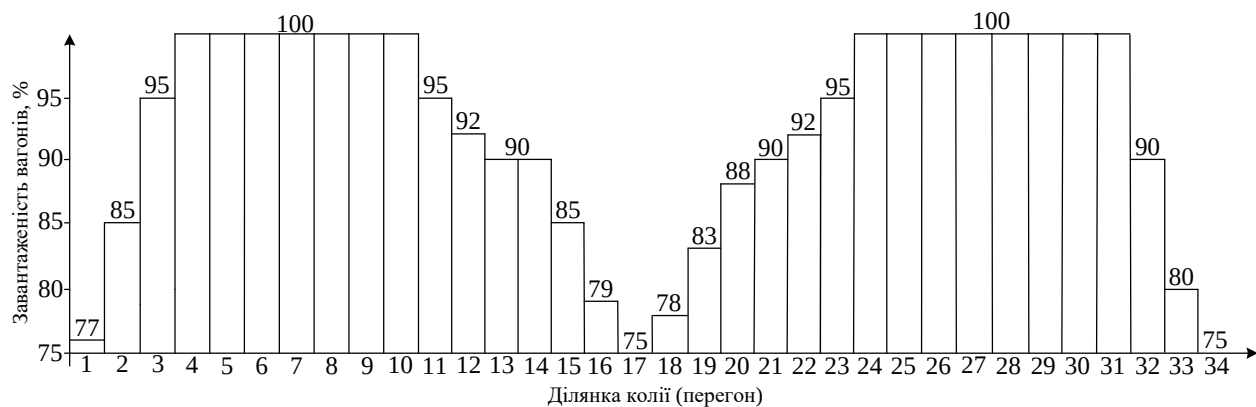
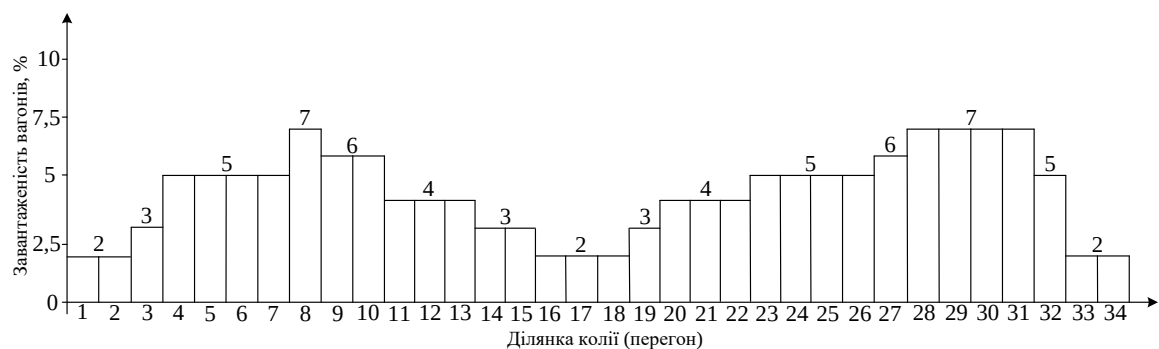
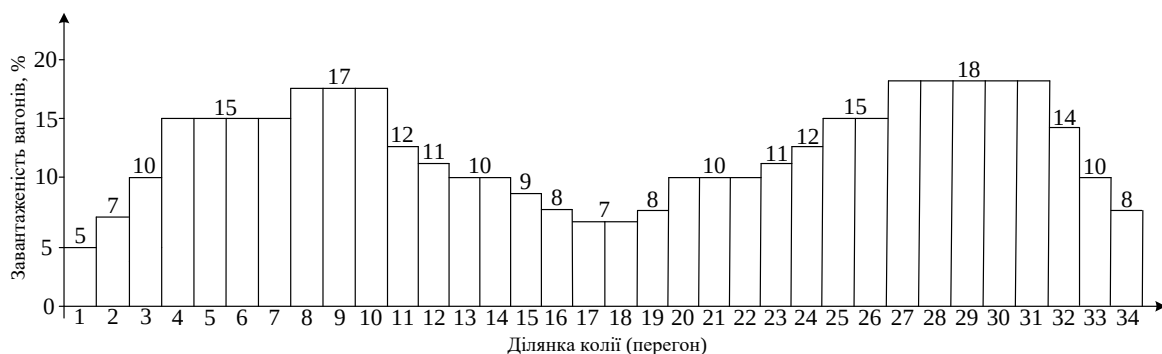


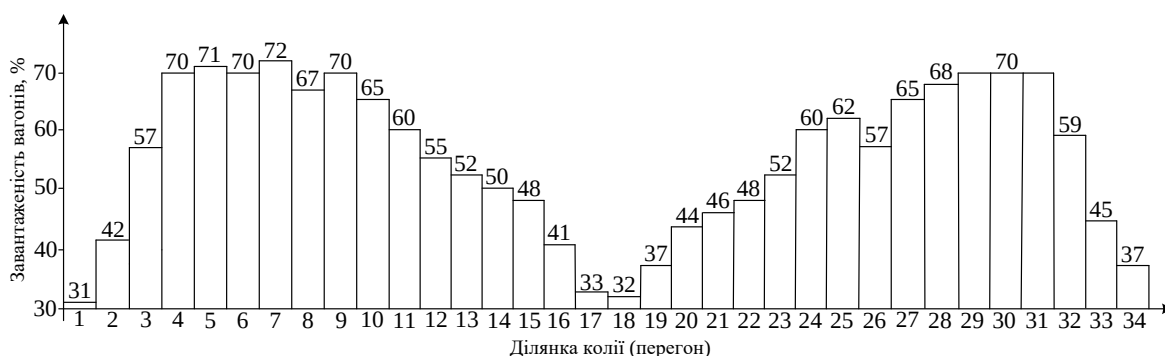
Рисунок 5 – Завантаженість поїзда протягом доби у робочий день під час його експлуатації за «піковим» графіком (8⁰⁰–9⁰⁰; 17⁰⁰–18⁰⁰)



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Завантаженість поїзда протягом доби у вихідний день під час його експлуатації за «непіковим» графіком: а) 5³⁰–8⁰⁰; 22⁰⁰–23³⁰; б) 8⁰⁰–9⁰⁰; 21⁰⁰–22⁰⁰; в) 9⁰⁰–21⁰⁰

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, а); 1 коло – завантаження (рис. 4, б); 2 кола – завантаження (рис. 4, в); 2 кола – завантаження (рис. 4, г)) та два повних кола з дотриманням «пікового» графіку руху (рис. 5);
- у вихідні дні (2 дні на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіку (1 коло з мінімальним завантаженням (рис. 6, а); 1 коло – завантаження (рис. 6, б); 5 кіл – завантаження (рис. 6, в);
- протягом року поїзд експлуатується 315 днів, з яких 225 робочих і 90 вихідних.

Результати обробки даних комп'ютерного моделювання з використанням програмних засобів «Motion Simulation» та «Rational Trajectory» наведено у таблицях 1–4.

Таблиця 1.

Результати обробки даних під час типових режимів ведення поїзда у робочий день з використанням програмного засобу «Motion Simulation»

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4, а) / завантаження поїзда (рис. 4, б) / завантаження поїзда (рис. 4, в) / завантаження поїзда (рис. 4, г) / «піковий» графік руху за умов максимального завантаження (рис. 5)		
	А _{тяги} , кВт·год	А _{рек} , кВт·год	Р _{max} , МВт
1	2	3	4
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

Продовження таблиці 1.

1	2	3	4
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 2.

Результати обробки даних під час типових режимів ведення поїзда у вихідний день з використанням програмного засобу «Motion Simulation»

Досліджувана ділянка	«Непиковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 6, а) / завантаження поїзда (рис. 6, б) / завантаження поїзда (рис. 6, в)		
	Атязи, кВт·год	Арек, кВт·год	P _{max} , МВт
1	2	3	4
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–Академістечко	2,15/2,3/2,63	2,01/2,11/2,44	0,88/0,91/1,0
Академістечко–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

Продовження таблиці 2.

1	2	3	4
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

Таблиця 3.

Результати обробки даних під час типових режимів ведення поїзда у робочий день з використанням програмного засобу «Rational Trajectory»

Досліджувана ділянка	«Непіковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 4, а) / завантаження поїзда (рис. 4, б) / завантаження поїзда (рис. 4, в) / завантаження поїзда (рис. 4, г) / «піковий» графік руху за умов максимального завантаження (рис. 5)		
	A _{тяги} , кВт·год	A _{рек} , кВт·год	P _{max} , МВт
1	2	3	4
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
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.

Результати обробки даних під час типових режимів ведення поїзда у вихідний день з використанням програмного засобу «Rational Trajectory»

Досліджувана ділянка	«Непиковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 6, а) / завантаження поїзда (рис. 6, б) / завантаження поїзда (рис. 6, в)		
	А _{тяги} , кВт·год	А _{рек} , кВт·год	Р _{max} , МВт
1	2	3	4
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–Академістечко	2,11/2,25/2,57	2,07/2,21/2,63	0,9/1,01/1,03
Академістечко–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
Університет–Театральна	5,21/5,6/7,18	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 отриманих даних комп'ютерного моделювання (табл. 1–4) встановлено перші граничні значення параметрів бортового СНЕ:

- для першого методу з використанням програми «Motion Simulation» Р_{СНЕ}€[0...3,88], А_{СНЕ}€[0...45,09];
- для другого методу з використанням програми «Rational Trajectory» Р_{СНЕ}€[0...4,82], А_{СНЕ}€[0...43,49].

З використанням даних комп'ютерного моделювання (табл. 1–4) також встановлено резерви заощадження енергоресурсів завдяки впровадженню раціональних режимів ведення поїзда замість типових.

Кількість заощадженої електроенергії за рік визначено за формулою:

$$\alpha = 100 - \left(\frac{A_{\text{тяги(рац)}}}{A_{\text{тяги(тип)}}} \right) \cdot 100, \quad (4)$$

де А_{тяги(рац)} – кількість спожитої електроенергії протягом року за раціональних режимів ведення поїзда метрополітену; А_{тяги(тип)} – кількість спожитої електроенергії протягом року за типових режимів ведення поїзда метрополітену.

Кількість спожитої електроенергії протягом року за раціонального ведення визначається за формулою:

$$A_{\text{тяги(рац)}} = k \cdot \left(m_1 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(рац)}}_i + m_2 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(рац)}}_i + \dots + m_5 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(рац)}}_i \right) + \\ + 1 \cdot \left(m_1 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(рац)}}_i + m_2 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(рац)}}_i + m_3 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(рац)}}_i \right) \quad (5)$$

де k – кількість робочих днів експлуатації складу на рік; m – кількість кіл для певної умови експлуатації; i – порядковий номер досліджуваної ділянки (перегону); n – кількість досліджуваних ділянок (перегонів); l – кількість вихідних днів експлуатації складу на рік.

Аналогічним чином визначається кількість спожитої електроенергії протягом року за типових режимів ведення поїзда метрополітену:

$$A_{\text{тяги(тип)}} = k \cdot \left(m_1 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(тип)}}_i + m_2 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(тип)}}_i + \dots + m_5 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(тип)}}_i \right) + 1 \cdot \left(m_1 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(тип)}}_i + m_2 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(тип)}}_i + m_3 \cdot \sum_{i=1}^n A_{\text{тяги(тип)}}_i \right) \quad (6)$$

За результатами розрахунків, виконаних за формулами (4)–(6) встановлено, що завдяки впровадженню в систему керування поїздом програмного засобу «Rational Trajectory» можливо заощадити близько 11 % об'єму електроенергії, що витрачається на тягу.

В якості типів конденсаторних модулів обрано BMOD0063P125 B08, BMOD0094P075 B02, BMOD0165P048 C01, BMOD0500P016 B02 виробництва Maxwell Technologies Inc., так як ці модулі комерціалізовані та на них є у вільному доступі повна технічна документація. Загальний вигляд обраних конденсаторних модулів зображено на рис. 7. Технічні характеристики обраних модулів наведено в табл. 5.



Рисунок 7 – Загальний вигляд конденсаторних модулів виробництва Maxwell Technologies Inc.:

BMOD0063P125 B08 (а), BMOD0094P075 B02 (б), BMOD0165P048 C01 (в), BMOD0500P016 B02 (г)

Таблиця 5.

Технічні характеристики обраних конденсаторних модулів

Назва показника	Тип конденсаторного модуля			
	BMOD0063P125 B08	BMOD0094P075 B02	BMOD0165P048 C01	BMOD0500P016 B02
Робоча напруга, В	136-68	91-40,5	51-20,5	17-8,5
Номінальна 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
Енергія, 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 зазначених конденсаторних модулів. Маса 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 систем керування та інших додаткових матеріалів. Аналогічним чином визначено і об'єми систем накопичення. 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, граничні максимальні значення потужності та енергоємності систем накопичення, наведено в табл. 6.

Таблиця 6.

Результати розрахунків максимальних значень потужності і енергоємності обраних систем накопичення

Параметр (характеристика)	Тип конденсаторного модуля			
	BMOD0063P125 B08	BMOD0094P075 B02	BMOD0165P048 C01	BMOD0500P016 B02
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

З урахуванням визначених обмежень остаточно встановлені такі граничні значення параметрів:

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу BMOD0063P125B08 з використанням першого методу – $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 11,6]$; з використанням другого методу – $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,1]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 2,3]$.

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу BMOD0094P075B02 з використанням першого методу – $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 18,9]$; з використанням другого методу – $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,0]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,0]$.

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу BMOD0165P048C01 з використанням першого методу – $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 18,4]$; з використанням другого методу – $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 4,82]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,4]$.

– для систем накопичення з конденсаторних модулів типу BMOD0500P016B02 з використанням першого методу – $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 3,88]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 4,4]$; з використанням другого методу – $P_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 4,82]$, $A_{\text{СНЕ}} \in [0 \dots 1,0]$.

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. 7.

Таблиця 7.

Обрані параметри бортових ємнісних накопичувачів енергії

Тип конденсаторного модуля	Потужність, МВт	Енергоємність, кВт·год	Тип конденсаторного модуля	Потужність, МВт	Енергоємність, кВт·год
Перший метод			Другий метод		
BMOD0063P125 B08	1,5; 3,1; 3,8	1,1; 2,3; 3,4	BMOD0063P125 B08	1,5; 3,1	1,1; 2,3
BMOD0094P075 B02	1,1; 2,2; 3,2	1,1; 2,2; 3,2	BMOD0094P075 B02	1,1; 2,2	1,1; 2,2
BMOD0165P048 C01	1,7; 3,3; 3,8	1,1; 2,2; 3,2	BMOD0165P048 C01	1,7; 3,3; 4,8	1,1; 2,2; 3,2
BMOD0500P016 B02	1,7; 3,3	0,3; 0,6	BMOD0500P016 B02	1,7; 3,3	0,3; 0,6

Таким чином, обрано 11 та 9 систем накопичення з різним рівнем потужності і енергоємності бортових СНЕ, які задовольняють розрахованим обмеженням для першого та другого методів відповідно.

Здійснено оцінку вартості обраних систем накопичення та кількості заощадженої електроенергії за рахунок їх впровадження. Під час досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії прийнято наступні припущення: перед проведенням розрахунків накопичувач повністю розряджений, коефіцієнт корисної дії (ККД) накопичувача складає 0,98 ($\eta_{\text{СНЕ}}=0,98$), ККД реверсивного перетворювача – 0,96 ($\eta_{\text{РП}}=0,96$), ККД редуктора – 0,98

($\eta_{ред}=0,98$), ККД тягового двигуна ($\eta_{тд}$) змінюється за залежністю, яку представлено на рис. 8.

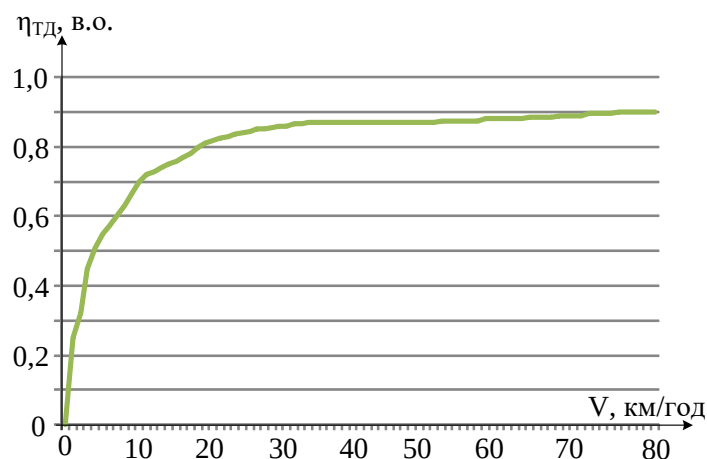


Рисунок 8 – Залежність коефіцієнта корисної дії тягового двигуна від швидкості руху поїзда

Методологію досліджень з оцінки кількості заощадженої електроенергії детально представлено в роботах [23, 30]. Під час виконання цих досліджень визначались наступні показники: кількість заощадженої електроенергії за цикл збереження електроенергії (рекуперативне гальмування та її акумулювання під час розгону поїзда), кількість заощадженої електроенергії для кожної типової умови експлуатації, кількість заощадженої електроенергії за один день та рік.

Розраховано термін окупності обраних систем накопичення як відношення вартості від впровадження цих систем до вартості заощадженої електроенергії за рік:

$$T_{ок} = \frac{Q}{T_e \cdot E_r} \quad (7)$$

де Q – вартість системи накопичення; T_e – тариф на електроенергію ($T_e = 3,42$ грн/кВт·год).

Результати розрахунку терміну окупності для обраних систем накопичення наведено у табл. 8.

Таблиця 8.

Результати розрахунку терміну окупності обраних систем накопичення

Тип конденсаторного модуля	Потужність, МВт	Енергоємність, кВт·год	Термін окупності, років
Перший метод			
BMOD0063P125 B08	1,5; 3,1; 3,8	1,1; 2,3; 3,4	6,2; 5,6; 5,8
BMOD0094P075 B02	1,1; 2,2; 3,2	1,1; 2,2; 3,2	5,1; 5,0; 5,2
BMOD0165P048 C01	1,7; 3,3; 3,8	1,1; 2,2; 3,2	4,6; 4,4; 4,4
BMOD0500P016 B02	1,7; 3,3	0,3; 0,6	17,8; 17,2
Другий метод			
BMOD0063P125 B08	1,5; 3,1	1,1; 2,3	6,3; 5,9
BMOD0094P075 B02	1,1; 2,2	1,1; 2,2	5,2; 5,2
BMOD0165P048 C01	1,7; 3,3; 4,8	1,1; 2,2; 3,2	4,6; 4,6; 5,0
BMOD0500P016 B02	1,7; 3,3	0,3; 0,6	17,8; 17,2

Таким чином, для першого та другого методів раціональною є система накопичення з конденсаторних модулів типу BMOD0165P048 C01. За першим методом раціональна потужність бортового ЄНЕ становить 3,8 МВт, а енергоємність - 3,2 кВт·год; за другим потужність - 3,3 МВт, енергоємність - 2,2 кВт·год.

Результати визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ для заданих умов з використанням першого та другого багатокритеріальних методів оцінки, а також техніко-економічні показники за умов їх впровадження, приведено в табл. 9.

Кількість заощадженої електроенергії за рахунок впровадження систем накопичення з раціональними параметрами бортового ЄНЕ розраховують за формулою:

$$\alpha = \frac{E_r}{A_{\text{тяги(рік)}}} \cdot 100, \quad (8)$$

Відношення маси системи накопичення до маси поїзда в порожньому та максимально завантаженому стані визначається за формулою:

$$m_0 = \frac{m_{\text{СНЕ}}}{m_1(m_2)} \cdot 100, \quad (9)$$

де $m_{\text{СНЕ}}$ – маса системи накопичення, т; m_1 – маса поїзда в порожньому стані, т; m_2 – маса поїзда в максимально завантаженому стані, т.

Прискорення поїзда під час розгону з урахуванням розміщення системи накопичення на борту визначається за формулою:

$$a_{\text{п СНЕ}} = \frac{F_{\text{тяги}} - W_{\text{осн}}}{(m_3 + m_{\text{СНЕ}})(1 + \gamma)}, \quad (10)$$

де $F_{\text{тяги}}$ – пускова сила тяги, кН; $W_{\text{осн}}$ – основний опір руху, кН; m_3 – маса поїзда під час номінального завантаження, т; $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових мас.

Погіршення динамічних показників поїзда під час розгону визначається за формулою:

$$a_0 = \frac{(a_{\text{п}} - a_{\text{п СНЕ}})}{a_{\text{п}}} \cdot 100, \quad (11)$$

де $a_{\text{п}}$ – пускове прискорення поїзда без розміщення системи накопичення на борту, м/с².

Таблиця 9.

Результати визначення раціональних параметрів та показників руху поїзда

Назва показника	Визначення раціональних параметрів бортових СНЕ та показників руху поїзда	
	Метод з використанням програмного засобу «Motion Simulation»	Багатокритеріальний метод з використанням програмного засобу «Rational Trajectory»
Максимальна потужність, кВт	3800	3300
Робоча енергоємність, кВт·год	3,2	2,2
Тип конденсаторного модуля	BMOD0165P048 C01	BMOD0165P048 C01
Діапазон робочої напруги бортового СНЕ,	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, %	0,4	0,4

Результати визначених параметрів та їх порівняльний аналіз (табл. 1-9), отриманих з використанням багатокритеріальних методів оцінки на основі теоретичних досліджень за допомогою програмних засобів «Motion Simulation» та «Rational Trajectory» за однакових заданих умов, дозволили встановити наступне:

– залежно від застосування того чи іншого методу оцінки термін окупності системи накопичення з раціональними параметрами складає 4,4; 4,6 років, маса - 0,92 т; 1,38 т; об'єм - 0,94 м³; 1,41 м³. При цьому впровадження систем накопичення з раціональними параметрами дозволить заощадити на рівні 19,7% та 14,8% від об'єму спожитої електроенергії поїздом на тягу та погіршити динаміку розгону поїзда на 0,4% за умов незмінного значення пускової сили тяги;

– впровадження в систему керування поїздом метрополітену програмного засобу «Rational Trajectory» дозволить додатково заощадити на рівні 11% об'єму електроенергії, що витрачається на тягу поїздом метрополітену навіть без розміщення на ньому системи накопичення;

– багатокритеріальний метод оцінки з використанням програмного засобу «Rational Trajectory» має переваги у порівнянні з іншим методом завдяки можливості вибору раціональних параметрів бортових ЄНЕ з урахуванням такого важливого чинника як обмеження за об'ємом, а також можливістю замінити типові режими ведення на заданій ділянці колії одним раціональним режимом ведення, який визначається на підставі забезпечення заданого графіку руху та критерію мінімального споживання електроенергії з контактної мережі.

Висновки.

1. Дістали подальшого розвитку дослідження з аналізу резервів енергозбереження на рухомому складі метрополітену за рахунок впровадження на ньому системи для пошуку раціонального режиму ведення, систем рекуперації та накопичення.

2. З застосуванням багатокритеріальних методів оцінки на основі теоретичних досліджень з використанням програмних засобів «Motion Simulation» та «Rational Trajectory» визначено раціональні параметри бортового ЄНЕ для однакових заданих умов, а саме типу рухомого складу метрополітену, штатних заданих умов його експлуатації, обраних типів конденсаторних модулів. Встановлено, що раціональними є системи накопичення, зібрані з конденсаторних модулів типу BMOD0165P048 C01, робоча енергоемність яких складає 3,2 кВт·год та 2,2 кВт·год, а максимальна потужність - 3,8 МВт та 3,3 МВт відповідно. Визначено, що термін окупності цих систем складає 4,4; 4,6 років, маса - 0,92 т; 1,38 т; об'єм - 0,94 м³; 1,41 м³. При цьому впровадження систем накопичення з раціональними параметрами дозволить заощадити на рівні 19,7% та 14,8% від об'єму спожитої електроенергії поїздом на тягу та погіршити динаміку розгону поїзда на 0,4% за умов незмінного значення пускової сили тяги.

3. Найбільший інтерес має визначення параметрів з використання багатокритеріального методу оцінки за допомогою програмного засобу «Rational Trajectory», оскільки він дозволяє обґрунтувати раціональний вибір системи накопичення відразу за трьома важливими критеріями - обмеженнями за масою і об'ємом та мінімальним терміном окупності системи накопичення. Тому, в подальших роботах запропоновано досліджувати у складі поїзда метрополітену систему накопичення з раціональними параметрами, яку визначають саме за цим багатокритеріальним методом оцінки.

Рекомендації.

Подальші дослідження потрібно зосередити на розробці системи керування енергообмінними процесами на рухомому складі метрополітену з бортовими ЄНЕ, здатної здійснювати ефективний енергообмін між тяговим і гальмівним обладнанням, бортовим ЄНЕ, контактною мережею автоматично незалежно від режиму ведення поїзда, режиму роботи системи енергозабезпечення метрополітену та характеру протікання енергетичних процесів в контактній мережі.

Література

1. Михайленко Ю.В., Голік С.М., Василенко Д.О. Стан та перспективи експлуатації електропоїздів Дніпровського метрополітену / Ю.В. Михайленко, С.М. Голік, Д.О. Василенко // Матеріали 81 Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Кременчук: Вид-во ДП «УкрНДІВ», 2019. – Вип. 18. – С. 4–25.
2. Шевлюгин М.В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии / М.В. Шевлюгин, К.С. Желтов // НТТ – Наука и техника транспорта. – 2008. – № 1. – С. 15–20.
3. Мелешин И.С. Как сэкономить на тягу / И.С. Мелешин // Энергоэффективность и энергосбережение. – 2013. – Вип. 7-8. – С. 65–67.
4. Донченко А.В. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену / А.В. Донченко, А.О. Сулим, О.С. Сіора, О.О. Мельник, В.В. Федоров // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпроп. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. В. Лазаряна. – 2016. – № 3 (63). – С. 108–119.
5. Щуров Н.И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / Н.И. Щуров, К.В. Щеглов, А.А. Штанг // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2008. – № 1(51). – С. 99–104.
6. Кузнецов В.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена / В.Г. Кузнецов, О.И. Саблин, П.В. Губский, Е.Г. Колыхаев // Гірнична електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. нац. гірничого ун-ту. – 2015. – № 95. – С. 68–73.
7. Жемеров Г.Г. Уменьшение потерь энергии в системах электроснабжения подвижного состава метрополитена при использовании энергоемких накопителей электроэнергии / Г.Г. Жемеров, Ильина Н.А., Тугай Д.В. // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 137–138.
8. Khodaparastan M. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems / M. Khodaparastan, A. Mohamed Ahmad, W. Brandauer // IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems. – 2018. – № 20. – Р. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
9. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 8(72) / том 6/. – С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483>

10. Sulym A. Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock / A. Sulym, A. Lomonos, O. Bialobrzheskyi, O. Safronov, P. Khozia // *Naukovyi Visnyk Natsionalnogo Hirnychoho Universytetu*. – 2020. – № 3. – P. 84–91. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>
11. Sulym A. Theoretical and practical determination of parameters of On-board capacitive energy storage of the rolling stock / A. Sulym, O. Fomin, P. Khozia, A. Mastepan // *Naukovyi Visnyk Natsionalnogo Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – № 5. – P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
12. Мятеж А.В. Определение энергоемкости бортового буферного конденсаторного накопителя для городского электрического транспорта / А.В. Мятеж, М.В. Ярославцев // *Транспорт Российской Федерации. Электроснабжение и электротехника*. – 2013. – № 4 (47). – С. 62–65.
13. Патент RU 2436690C2 Российская Федерация, МПК В60L 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; заяв. 11.02.2010; опубл. 20.12.11. Бюл. № 35. – 18 с.
14. Елисеев А.Д. Суперконденсаторы Nesscap повышают энергоэффективность электроприводов / А.Д. Елисеев, С.А. Фурсов // *Электронные компоненты*. – 2015. – № 2. – С. 84–87.
15. Ratniyomchai T. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways / T. Ratniyomchai, S. Hillmarsen, P. Tricoli // *ET Electr. Syst. Transp.* 2014. Vol. 4. № 1. P. 9–20.
16. 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.
17. Рябов Е.С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети / Е.С. Рябов // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Харків, 2015. № 6 (1115). С. 132–137.
18. Костин Н.А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н.А. Костин, А.В. Никитенко // *Залізничний транспорт України*. – 2014. – № 3. – С. 15–23.
19. Муха А.М., Костін М.О., Куриленко О.Я., Ципля Г.В. Підвищення ефективності роботи електроприводу постійного струму на основі використання суперконденсаторних накопичувачів електроенергії / А.М. Муха, М.О. Костін, О.Я. Куриленко, Г.В. Ципля // *Наука та прогрес транспорту. Вісник ДНУЗТ ім. В. Лазаряна*. – 2017. – № 5 (71). – С. 48–60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624>
20. Fomin O. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock / O. Fomin, A. Sulym, I. Kulbovskiy, P. Khozia, V. Ishchenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – № 2 (92). – P. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
21. Sulym A. Development of a comprehensive approach to determining the rational parameters of an onboard capacitive energy accumulator for a subway train/ A. Sulym, O. Fomin, P. Khozia, O. Palant, V. Stamatina // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – № 3 (102). – P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
22. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage / S. Yatsko, A. Sidorenko, Ya. Vashchenko, B. Lyubarskyi, B. Yeritsyan // *International journal of renewable energy research*. – Vol. 9. – No. 2. – P. 848–858.
23. Сулим А.О. Удосконалення методології визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії / А.О. Сулим, П.О. Хозя // *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп. ім. В. Лазаряна*. – 2020. – № 5(89). – С. 45–67. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/218603>
24. Сулим А.О. Багатокритеріальний підхід до обґрунтування вибору раціональних параметрів ємнісного накопичувача для поїзда метрополітену/ А.О. Сулим // *International scientific conference "New development areas of digitalization at the beginning the third millennium"*, December 10-11, 2021. Riga, Republic of Latvia, 2021. – P. 50-54. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-172-5-13>
25. Сулим А.О. Програмне забезпечення для моделювання руху поїзда метрополітену / А.О. Сулим, О.С. Сіора, П.О. Хозя, О.О. Мельник // *Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. Серія «Транспортні системи і технології»*. – К.: ДУІТ, 2019. – Вип. 34. – С. 182-198.
26. Сулим А.О. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення для визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену / А.О. Сулим, О.С. Сіора, О.О. Мельник, П.О. Хозя, Е.В. Третьак // *Вісник Східноукраїнського нац. ун-ту імені В. Даля*. – 2020. – № 5(261). – С. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-261-5-57-66>.
27. Розенфельд В.Е. Теория электрической тяги / В.Е. Розенфельд, И.П. Исаев, Н.Н. Сидоров, М.И. Озеров : Под ред. И.П. Исаева. М.: Транспорт, 1995. – 294 с.
28. СОУ МПП 45.060-253:2008 Вагони метрополітену. Загальні технічні вимоги. [Чинний від 2010-01-01] Вид. офіц. Київ: Міністерство промислової політики України. – 2008. – 29 с.
29. 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.
30. Сулим А.А., Ломонос А.И. Расчет энергии рекуперации при установке накопителя на электропоезде метрополитена. *Збірник наукових праць ДЕТУТ: Серія «Транспортні системи і технології»*. Київ: ДЕТУТ, 2013. Вип. 23. С. 22–29.

References

1. Mykhailenko Yu.V., Holik S.M., Vasylenko D.O. (2019). Stan ta perspektyvy ekspluatatsii elektropoizdiv Dniprovskoho metropolitenu [State and prospects of operation of electric trains of the Dnipro metro] *Proceedings from 81 Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii «Problemy ta perspektyvy rozvytku zaliznychnoho transportu» - The 81st International Scientific and Practical Conference "Problems and Prospects of Railway Transport Development"*. Kremenchuk: SE "UkrNDIV", 18, 4–25 [in Ukrainian]
2. Shevlyugin M.V., Zheltov K.S. (2008). Snizhenie raskhoda elektroenergii na dvizhenie poezdov v Moskovskom metropolitene pri ispol'zovanii emkostnyh nakopitelej energii [Reduction of electricity consumption for train traffic in the Moscow metro when using capacitive energy storage devices] *NTT – Nauka i tekhnika transporta – NTT - Transport Science and Technology*, 1, 15–20 [in Russian]
3. Meleshin I.S. (2013). Kak sekonomit' na tyagu [How to save on traction]. *Energoeffektivnost' i energosberezhenie - Energy efficiency and energy saving*, 7-8, 65–67 [in Russian]
4. Donchenko A.V., Sulym A.O., Siora O.S., Melnyk O.O., Fedorov V.V. (2016). Analiz pytan enerhozberezhennia ta enerhoefektyvnosti pid chas ekspluatatsii rukhomoho skladu metropolitenu [Analysis of issues of energy saving and energy efficiency during the operation of the rolling stock of the metro] *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dniprop. nats. un-tu zalizn. transp.im. V. Lazariana. – Science and progress of transport. Bulletin of the Nnational Railway University transp.im. V. Lazaryan*, 3 (63), 108–119 [in Ukrainian]
5. Schurov N.I., Shtang A.A., Shcheglov K.V. (2008). Primenenie nakopitelej energii v sistemah elektricheskoy tyagi [The use of energy storage devices in electric traction systems]. *Sbornik nauchnyh trudov NGTU - Collection of scientific works of NSTU*, 1(51), 99–104. Novosibirsk [in Russian]
6. Kuznecov V.G., Sablin O.I., Gubskij P.V., Kolyhaev E.G. (2015). Analiz rezervov energosberezheniya pri vnedrenii sistemy rekuperatsii energii na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitena [Analysis of energy saving reserves during the implementation of the energy recovery system on the trains of the Dnepropetrovsk metro]. *Girnichia elektromekhanika ta avtomatika: nauk.tekhn. zb. nac. girnichogo un-tu – Mining electromechanics and automation: Scientific bulletin of National Mining University*, 95, 68–73 [in Russian]
7. Zhemerov G.G., Il'ina N.A., Tugaj D.V. (2014). Umen'shenie poter' energii v sistemah elektrosnabzheniya podvizhnogo sostava metropolitena pri ispol'zovanii energoemkih nakopitelej elektroenergii [Reduction of energy losses in the power supply systems of the underground rolling stock when using energy-intensive energy storage devices] *Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodynamics*, 5, 137–138 [in Russian]
8. Khodaparastan M., Mohamed Ahmad A., Brandauer W. (2018). Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 20, 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
9. Sablin O.I. (2014). Doslidzhennia efektyvnosti protsesu rekuperatsii elektroenerhii v umovakh metropolitenu [Study of the efficiency of the electricity recovery process in the conditions of the metro]. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tekhnologij – Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 8(72) (Vol. 6), (pp. 9–13). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30483> [in Ukrainian]
10. Sulym A., Lomonos A., Bialobrzheskyi O., Safronov O., Khozia P. (2020). Analysis of technical solutions for the implementation of on-board energy storage on the electric stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnogo Hirnychogo Universytetu*, 3, 84–91. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-3/059>
11. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of On-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnogo Hirnychogo Universytetu*, 5, 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
12. Myatezh A.V., Yaroslavcev M.V. (2013). Opredelenie energoemkosti bortovogo bufernogo kondensatornogo nakopitelya dlya gorodskogo elektricheskogo transporta [Determination of the energy intensity of the onboard buffer capacitor storage for urban electric transport]. *Transport Rossijskoj Federacii. Elektrosnabzhenie i elektrotekhnika - Transport of the Russian Federation. Power supply and electrical engineering* [in Russian]
13. Limanskij S.S. Sposob dvizheniya elektricheskogo transportnogo sredstva na rekuperirovannoj elektroenergii i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya [Method of driving an electric vehicle on recovered electricity and a device for its implementation]. *Russian Federation Patent RU 2436690C2*, 2011 Dec. 20. Appl. No 2010104636/11, 2010 Febr. 11. Int. Cl. B60L 7/12. 18 p. [in Russian]
14. Eliseev A.D., Fursov S.A. (2015). Superkondensatory Nesscap povyshayut energoeffektivnost elektropriwodov [Nesscap supercapacitors increase the energy efficiency of electric drives]. *Elektronnye komponenty - Electronic components*, 2, 84–87 [in Russian]
15. Ratniyomchai T., Hillmarsen S., Tricoli P. (2014). Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *ET Electr. Syst. Transp.*, 1, (Vol. 4), (pp. 9–20).
16. Vasiliev V.A. (2012). Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektropoezdov postoyannogo toka [Increasing the energy efficiency of electric trains of direct current]. *Extended abstract of candidate's thesis*. St. Petersburg [in Russian]
17. Ryabov E.S. (2015). Opredelenie parametrov nakopitelya energii dlya elektropodvizhnogo sostava s asinhronnym tyagovym privodom v rezhime ogranicheniya toka tyagovoj seti [Determination of energy storage parameters for electric rolling stock with asynchronous traction drive in the traction network current limiting mode]. *Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» - Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. Kharkiv, 6 (1115), 132-137 [in Russian]

18. Kostin N.A., Nikytenko A.V. (2014). Avtonomnost rekuperativnogo tormozheniya – osnova nadezhnoy energoeffektivnoy rekuperatsii na elektropodvizhnom sostave postoyannogo toka [Autonomy of recuperative braking is the basis of reliable energy-efficient recuperation on electromotive components of direct current]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy - Railway transport of Ukraine*, 3, 15–23 [in Russian]
19. Mukha A.M., Kostin M.O., Kurylenko O.Ya., Tsyplia G.V. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty elektropryvodu postiinoho strumu na osnovi vykorystannia superkondensatornykh nakopychuvachiv elektroenerhii [Increasing the efficiency of the direct current electric drive based on the use of supercapacitor energy storage devices]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipro nats. un-tu zaliznychnoho transp. im. V. Lazariana - Science and progress of transport. Visnyk of Dnipro national University of Railway Transp. named after V. Lazaryan*, 5 (71), 48–60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624> [in Ukrainian]
20. Fomin O., Sulym A., Kulbovskiy I., Khozia P., Ishchenko V. (2018). Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (92), 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
21. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Stamatina V. (2019). 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*, 3 (102), 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
22. Yatsko S., Sidorenko A., Vashchenko Ya., Lyubarskyi B., Yeritsyan B. Method to improve the efficiency of the traction rolling stock with onboard energy storage. *International journal of renewable energy research*, 2. (Vol. 9), (pp. 848–858).
23. Sulym A.O., Khozia P.O. (2020). Udoshkonalennia metodolohii vyznachennia ratsionalnykh parametriv yemnisnogo nakopychuvacha enerhii [Improvement of the methodology for determining the rational parameters of the capacitive energy storage]. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipro nats. un-tu zaliznychnoho transp. im. V. Lazariana - Science and progress of transport. Visnyk Dnipro national University of Railway Transp. named after V. Lazaryan*, 5(89), 45–67. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/218603> [in Ukrainian]
24. Sulym A.O. (2021). Bahatokryterialnyi pidkhyd do obgruntuvannia vyboru ratsionalnykh parametriv yemnisnogo nakopychuvacha dlia poizda metropolitenu [Multi-criteria approach to justifying the choice of rational parameters of a capacitive storage device for a metro train] *International scientific conference "New development areas of digitalization at the beginning the third millennium"*, December 10-11, 2021, (pp. 50-54). Riga, Republic of Latvia, – DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-172-5-13> [in Ukrainian]
25. Sulym A.O., Siora O.S., Khozia P.O., Melnyk O.O. (2019). Prohramne zabezpechennia dlia modeliuвання rukhu poizda metropolitenu [Software for simulating the movement of a metro train]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» – Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies. "Transport systems and technologies" series*, 34, 182-198. K.: DUIT [in Ukrainian]
26. Sulym A.O., Siora O.S., Melnyk O.O., Khozia P.O., Tretiak E.V. (2020). Rozrobka alhorytmichnogo ta prohramnogo zabezpechennia dlia vyznachennia ratsionalnogo rezhymu vedennia poizda metropolitenu [Development of algorithmic and software for the appointment of a rational mode of driving the metro train]. *Visnyk Skhidnoukr. nats. un-tu imeni Volodymyra Dalia - Bulletin of East Ukr. nat. University named after Volodymyr Dahl*, 5(261), 57–66. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-261-5-57-66> [in Ukrainian]
27. Rosenfeld V.E., Isaev I.P., Sidorov N.N., Ozerov M.I. (1995). *Teoriya elektricheskoy tyagi [Theory of electric traction]*. I.P. Isaev (Ed).. M.: Transport [in Russian]
28. Vahony metropolitenu. Zahalni tekhnichni vymohy [Metro cars. General technical requirements]. (2008). SOU MPP 45.060-253:2008 from the 1-st January, 2010. Kyiv: Ministry of Industrial Policy of Ukraine [in Ukrainian]
29. Vahony metropolitenu modelej 81-7080 ta 81-7081. Kompleksna modernizatsiia z vprovadzhenniam asinkhronnogo tiagovogo pryvodu. Tekhnichni umovy [Metro cars of models 81-7080 and 81-708. Comprehensive modernization with the introduction of an asynchronous traction drive. Specifications]. (2014). TU U 30.2-05763814-111:2014 95 p. [in Ukrainian]
30. Sulim A.A., Lomonos A.I. (2013). Raschet energii rekuperatsii pri ustanovke nakopitelia na elektropoezde metropolitena. [Calculation of energy recovery when installing a storage device on a subway electric train]. *Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnologichnogo universytetu transportu. Seriya «Transportni systemy i tekhnolohii» – Collection of scientific works of the State Economics and Technology Transport University. "Transport systems and technologies" series*, 23, 22-29. K.: DETUT [in Ukrainian]

The article proposes to develop the theory of choosing rational parameters of the on-board capacitive energy storage for the given operating conditions of the metro rolling stock by applying multi-criteria evaluation methods using software tools. The description and step-by-step algorithms of two methods of evaluating the rational parameters of the on-board capacitive energy storage using software tools "Motion Simulation" and "Rational Trajectory" are presented. The rational power and energy capacity of the on-board capacitive energy storage, the mass and dimensional parameters of the storage systems with these storage units during the application of the specified methods for the same specified conditions (type of metro rolling stock, investigated track section, type of capacitor modules) were determined. It has been established that thanks to the implementation of the "Rational Trajectory" software tool in the metro rolling stock management system, it is possible to achieve savings of 11% of the electrical energy used for traction. The amount of

electricity savings due to the implementation of storage systems with rational parameters of on-board capacitive energy storage devices is determined for the specified operating conditions by using the specified methods. An evaluation method recommended for use in the future when it is necessary to determine the rational parameters of the on-board capacitive energy storage for metro rolling stock is determined.

Key words: *electrical energy, capacitive energy storage, savings, method, metro, software, rolling stock.*

Сулим А.О. - к.т.н., старший дослідник, заступник директора з наукової роботи, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. E-mail: sulim1.ua@gmail.com

Хозя П.О. - к.т.н., старший дослідник, завідувач лабораторії, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. E-mail: pavlo.khozia@gmail.com

Мельник О.О. - завідувач групи, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. E-mail: om.oleksandrmelnyk@gmail.com