

УДК 629.423:621.31

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ
ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ**

Канд. техн. наук А. О. Сулим

**COMPARATIVE ANALYSIS OF APPROACHES TO DETERMINING THE
PARAMETERS OF A CAPACITIVE ENERGY STORAGE FOR ELECTRIC ROLLING
STOCK**

PhD (Tech.) A. O. Sulym

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.202.2022.273623>



***Анотація.** У статті наведено та виконано порівняльний аналіз існуючих підходів з визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії для електрорухомого складу. Визначено потужність та енергоємність бортових ємнісних накопичувачів енергії для кожного з розглянутих підходів для однакових заданих умов експлуатації електрорухомого складу, що складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01. Визначено термін окупності та вплив на експлуатаційні показники електрорухомого складу систем накопичення з обраними параметрами за умови застосування різних підходів. Встановлено, що доцільним є застосування підходів, які ґрунтуються на визначенні раціональних параметрів з використанням теоретичних досліджень за допомогою програмних засобів і багатокритеріальних методів оцінювання.*

***Ключові слова:** ємнісний накопичувач енергії, метрополітен, підхід, порівняльний аналіз, електрорухомий склад.*

***Abstract.** The article deals with the main existing approaches to determining the parameters of on-board capacitive energy storages for electric rolling stock and their comparative analysis. The advantages and disadvantages of each of the ten considered approaches are set out. Each of the approaches is described and their comparative analysis is performed according to such criteria as the level of research complexity, the financial component of research, the possibility of taking into account the real operation conditions of electric rolling stock while carrying out the research,*

the method of evaluating the parameters of the on-board capacitive energy storage, the possibility of determining rational parameters, the universality of the approach, considering the technical and economic component and limitations on weight and size of indicators. The power and energy capacity of on-board capacitive energy storage devices, their weight-size indicators when applying each of the considered approaches for the same given operating conditions of the electric rolling stock are determined. A five-car articulated vehicle with an asynchronous traction drive and recovery systems, consisting of metro cars of models 81-7080, 81-7081, 81-7081-01, was chosen as the electric rolling stock. The experimental section between the final stations of the Sviatoshynsk-Brovary line of the utility company "Kyivskyi Metropolitan" was chosen as the specified operating conditions. The payback period and the impact of storage systems with the selected parameters on the performance indicators of the given electric rolling stock while using various approaches are determined. It was found that the most developed approaches, the key point of which is the selection of rational parameters using theoretical research with the help of application-specific software and multi-criteria evaluation methods. The feasibility of using a multi-criteria approach, which allows choosing rational parameters of the capacitive energy storage for electric rolling stock based on three important evaluation criteria, i.e., weight, volume and payback period, is demonstrated. It was established that it is rational to use an on-board capacitive energy storage device of low power and energy intensity.

Keywords: *capacitive energy storage, metro, approach, comparative analysis, electric rolling stock.*

Вступ. Одним з важливих і актуальних питань під час створення інноваційного електрорухомого складу з накопичувачами енергії є визначення їхніх енергетичних параметрів, у першу чергу потужності та енергоємності. Це питання потребує свого вирішення, як правило, за відомих заданих умов експлуатації (характеристик електрорухомого складу, ділянки експлуатації та профілю колії тощо). Важливість вирішення цього питання полягає в тому, що завдяки впровадженню систем накопичення енергії з раціональними параметрами можна досягти максимального економічного ефекту і мінімального терміну їхньої окупності, що в цілому дозволить знизити собівартість перевізного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазначеному питанню приділено достатньо уваги в дослідженнях як вітчизняних, так і закордонних вчених. Дослідженнями в цьому напрямі займалися такі вітчизняні вчені: Дибрін С. В., Жемеров Г. Г., Костін М. О., Рибалко А. Я., Муха А. М., Любарський Б. Г.,

Омельяненко В. І., Рябов Є. С., Сидоренко А. М., Яцько С. І. та інші. Серед закордонних вчених слід виділити дослідження Васильєва В. А., Єлисеєва Д. А., Лиманського С. С., Мятажа А. В., Фурсова С. А., Шевлюгіна М. В., Штанга А. А., Щурова М. І., Ярославцева М. В., Hillmarsen S., Iannuzzi D., Lewandowski M., Radu P. V., Ratniyomchai T., Szelag A., Szênâsy I., Tricoli P., Wiczorek M.

Ученими запропоновано ряд методів, концепцій і підходів (далі підходи) щодо визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ) для електрорухомого складу. Умовно ці підходи можна поділити на дві групи: з використанням методів теоретичних та експериментально-розрахункових досліджень.

В основу цих досліджень покладено використання таких методів та основних положень: положень теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування, методи аналізу характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперації, положень теорії

імовірності, теоретичні основи електротехніки, методи техніко-економічного аналізу, математичної статистики, математичного і комп'ютерного моделювання та інші.

За результатами аналізу робіт вищезазначених авторів наведено основні підходи, виконано порівняльний аналіз, сформульовано переваги і недоліки кожного з них.

Перший підхід. Найбільш простим технічним рішенням у цьому напрямі є розміщення бортового ЄНЕ значної потужності та енергоємності, здатного зберігати і повторно використовувати повний об'єм електроенергії рекуперативного гальмування електрорухомого складу під час заданих умов його експлуатації [1, 2]. Це технічне рішення можна застосовувати за відомих умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації, отриманих під час теоретичних або експериментальних досліджень [3]. Суть процедури полягає у визначенні параметрів бортового ЄНЕ за аналізом динаміки споживання та рекуперації електроенергії складом. Основними факторами, що стримують впровадження такого технічного рішення, є вартісні та масогабаритні показники бортового ЄНЕ. Тому в сучасних умовах розвитку на перший план виходить пошук технічних рішень, за яких застосовуються бортові ЄНЕ незначної потужності та енергоємності [4].

Другий підхід. У наявних дослідженнях [5, 6] запропоновано визначати параметри бортового ЄНЕ за оцінюванням кількості кінетичної енергії електрорухомого складу. Суть цього підходу полягає у здійсненні вибору параметрів бортового ЄНЕ за залежністю кількості енергії рекуперативного гальмування рухомого складу від швидкості початку гальмування. За цим підходом можна визначати потужність і кількість рекуперативного гальмування як для максимальної експлуатаційної швидкості руху складу, так і швидкості

руху, за якої найчастіше здійснюється рекуперативне гальмування (за графіком розподілу швидкості початку гальмування). У першому випадку параметри бортового ЄНЕ визначаються методом теоретичних досліджень за технічними характеристиками електрорухомого складу [7, 8], другому – методом експериментально-розрахункових досліджень за відомих умов експлуатації та технічних характеристик електрорухомого складу [5, 6]. Загальними перевагами обох випадків є простота і швидкість отримання результату. Оцінка тільки за технічними параметрами електрорухомого складу є досить грубою і не враховує низки факторів, зокрема реальних умов експлуатації складу (профілю колії, зміни завантаженості, графіка руху, сили гальмування, наявності електропневматичного гальмування тощо). В іншому випадку оцінка є менш грубою, але присутні такі недоліки: неможливість урахування зміни завантаження, електропневматичного гальмування (за наявності), визначення параметрів бортового ЄНЕ виконується за єдиним критерієм – найчастішою швидкістю початку гальмування, що не враховує техніко-економічну складову такого вибору.

Третій підхід. У роботі [10] запропоновано визначати параметри бортового ЄНЕ за тяговими характеристиками поїзда з урахуванням обмеження споживання струму тягової мережі. Підхід у цій роботі базується на визначенні параметрів за характеристиками роботи тягового асинхронного привода електрорухомого складу і передбачає використання основних положень теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування. Недоліками цього способу оцінювання є те, що не враховано профіль колії, графік руху, наявність електропневматичного гальмування, а також існують обмеження у сфері застосування. Підхід передбачає визначення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ тільки для електрорухомого

складу з частотно-регульованим тяговим асинхронним електроприводом.

Четвертий підхід. У дослідженнях [11, 12] параметри бортового ЄНЕ запропоновано визначити шляхом використання основних положень теорії імовірності. Основна ідея запропонованого підходу в цих роботах полягає у визначенні параметрів за аналізом характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування. Побудова характеристик (гістограм) виконується за результатами обробки осцилограм, отриманих експериментально під час реальних умов експлуатації електрорухомого складу. Зазначене оцінювання передбачає побудову гістограм з урахуванням усіх типових умов експлуатації складу протягом певного проміжку часу. Недоліком цього підходу є те, що вибір параметрів виконується на основі запропонованих критеріїв, які не дають змогу обґрунтувати визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ, а також не враховується техніко-економічна складова такого вибору. Слід зазначити, що перевагами цього підходу є врахування реальних умов експлуатації поїзда (профілю колії, завантаженості, сили гальмування тощо).

П'ятий підхід. У роботі [13] параметри бортового ЄНЕ запропоновано визначати, використовуючи теоретичні основи електротехніки, з урахуванням умов, головною з яких є та, щоб при цьому спостерігався аперіодичний чи граничний режим розряду ЄНЕ. Цей підхід заснований на застосуванні теоретичних методів досліджень (чисельних розрахунків з використанням основ електричної тяги та електротехніки). Суттєвим недоліком цього підходу є обмеження у сфері застосування. Такий підхід передбачає визначення енергоємності бортового ЄНЕ для рухомого складу з електроприводом постійного струму послідовного збудження. До інших недоліків слід віднести неможливість урахування

реальних умов експлуатації та різних режимів ведення складу.

Шостий підхід. У дослідженнях [14, 15] визначати параметри бортового ЄНЕ (потужності, енергоємності, діапазону робочих напруг тощо) запропоновано шляхом побудови осцилограм споживання та рекуперації електричної енергії під час руху складу за заданим маршрутом з використанням імітаційної комп'ютерної моделі. При цьому параметри визначають за середніми значеннями потужності та кількості електроенергії за один робочий цикл. Перевага цього підходу полягає у врахуванні реальних умов експлуатації складу, можливості врахування зміни завантаження на станціях, незначних фінансових ресурсах і середніх витратах часу під час виконання досліджень. Недоліки – визначення параметрів бортового ЄНЕ виконується за середніми значеннями потужності та енергоємності, що не дозволяє здійснювати вибір його раціональних параметрів; не враховується техніко-економічна складова такого вибору, а також обмеження за масогабаритними параметрами, враховується тільки один циклічний режим руху.

Сьомий підхід. У роботах [16, 17] вибір параметрів бортового ЄНЕ пропонується здійснювати за критерієм мінімального терміну окупності систем накопичення. Під системою накопичення розуміється бортовий ЄНЕ, реверсивний статичний перетворювач, система керування енергообмінними процесами між бортовим ЄНЕ і тяговим електроприводом та інше комплектуюче обладнання. Суть цього підходу полягає у визначенні параметрів за результатами аналізу характеристик (діаграм) терміну окупності обраних систем накопичення залежно від потужності та енергоємності їхнього бортового ЄНЕ. Цей підхід передбачає проведення експериментально-розрахункових досліджень. Перевага застосування цього підходу полягає у визначенні раціональних параметрів

бортового ЄНЕ за досить важливим критерієм, що враховує техніко-економічну складову під час здійснення вибору. При цьому враховуються реальні умови експлуатації електрорухомого складу з системами рекуперації. Недоліком такого підходу є тривалість виконання розрахунків, визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ здійснюється за одним критерієм – терміном окупності.

Восьмий підхід. У роботі [18] визначення раціональних параметрів бортових ЄНЕ відбувається за двома важливими критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення. Вирішення двокритеріальної задачі для цього підходу відбувається за методом послідовних поступок. Спочатку вирішується завдання визначення обмеження за масою, а потім виконується пошук рішення за головним критерієм – мінімальним терміном окупності. Цей підхід передбачає проведення експериментально-розрахункових досліджень. Перевага підходу – урахування реальних умов експлуатації поїзда, техніко-економічної складової, вибір раціональних параметрів за двома критеріями. Недоліки – використання експериментальних даних потребує значних фінансових ресурсів для проведення таких досліджень, складність і тривалість виконання розрахунків.

Дев'ятий підхід. У дослідженнях [19, 20] вибір параметрів бортових ЄНЕ відбувається за двома критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення. Підхід у цих роботах аналогічний підходу в роботі [18]. Основною різницею є застосування теоретичного методу дослідження шляхом застосування спеціалізованої комп'ютерної програми для моделювання руху складу замість даних експериментальних досліджень. Переваги порівняно з дослідженням у роботі [18] – можливість урахування зміни завантаження на станціях, значне зменшення фінансових

витрат на проведення досліджень, зменшення термінів виконання досліджень. Недоліком підходу є неможливість урахування раціональних режимів ведення на заданій ділянці, оскільки моделювання руху виконується для заданих штатних типових режимів ведення, а також тривалість виконання розрахунків.

Десятий підхід. У роботі [21] вибір раціональних параметрів бортових ЄНЕ пропонується здійснювати за трьома критеріями – обмеженнями за масою, об'ємом і мінімальним терміном окупності системи накопичення. В основі підходу закладено використання спеціалізованої комп'ютерної програми. Ця програма здатна визначати раціональні режими ведення електрорухомого складу на заданій ділянці колії за критеріями заданого часу руху та мінімального споживання електроенергії з контактної мережі. Суть цього підходу полягає у визначенні раціональних параметрів бортових ЄНЕ (потужності та енергоємності) за допомогою вирішення багатокритеріальної задачі методом головного критерію. Як головний критерій обрано мінімальний термін окупності системи накопичення, на інші два критерії – маса та об'єм системи накопичення – встановлено обмеження. Спочатку вирішується завдання визначення обмеження за масою та об'ємом, а потім виконується пошук рішення за головним критерієм – мінімальним терміном окупності. Обмеження накладаються з урахуванням технічних характеристик електрорухомого складу.

Переваги підходу – урахування реальних умов експлуатації електро-рухомого складу, можливість врахування зміни його завантаження, урахування техніко-економічної складової, обмежень за масогабаритними показниками, вибір параметрів здійснюється за раціональними режимами ведення складу, що визначаються за критерієм мінімального споживання електроенергії з контактної мережі, зменшення часу виконання

досліджень порівняно з підходами, в основу яких покладено проведення експериментальних досліджень, універсальність. Недоліки – складність і тривалість виконання досліджень.

У цій роботі запропоновано більш детально розглянути існуючі підходи до визначення параметрів бортових ЄНЕ з використанням конкретного типу електрорухомого складу та заданих умов його експлуатації.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є виконання порівняльного аналізу існуючих підходів з визначення параметрів ємнісного накопичувача енергії для електрорухомого складу. Для досягнення зазначеної мети поставлено такі завдання:

- виконати порівняльний аналіз підходів за різними критеріями оцінювання;

- визначити параметри бортового ємнісного накопичувача енергії на прикладі конкретного типу електрорухомого складу та заданих умов його експлуатації з застосуванням розглянутих підходів;

- визначити перспективні підходи з вибору параметрів ємнісного накопичувача енергії для електрорухомого складу з урахуванням різних критеріїв оцінювання за результатами їхнього комплексного порівняльного аналізу.

Основна частина дослідження. Для кожного з розглянутих підходів виконано порівняльний аналіз за такими критеріями: рівень складності виконання досліджень (витрати часу), фінансова складова досліджень, можливість урахування реальних умов експлуатації електро-рухомого складу, метод оцінювання параметрів бортового ЄНЕ, можливість визначення раціональних параметрів, універсальність підходу, урахування техніко-економічної складової та масогабаритних показників системи накопичення під час вибору.

Критерій рівня складності або витрати часу на виконання досліджень умовно має

таку класифікацію: простий (можливість проведення досліджень протягом одного дня), середній (від двох до п'яти днів), складний (більше п'яти днів). Фінансова складова передбачає значні, середні або незначні фінансові витрати. Цей критерій визначається за результатом порівняльного аналізу фінансових витрат розглянутих підходів між собою. До критерію врахування реальних умов експлуатації належать профіль колії, графік руху, зміна завантаження електрорухомого складу, наявність електропневматичного гальмування, урахування обмеження швидкості руху на заданій ділянці тощо. Кожен з підходів щодо визначення параметрів бортового ЄНЕ має свій критерій оцінювання, що вказується під час порівняльного аналізу. У разі можливості визначення раціональних параметрів бортового накопичувача вказуються критерії оцінювання, за якими вони визначаються (один або декілька). Підхід вважається універсальним, якщо його можна застосовувати для електрорухомого складу з різним типом електропривода та вибору різних систем накопичення, класифікованих за фізичним принципом (ємнісних, інерційних, електрохімічних тощо). Результати порівняльного аналізу для кожного з розглянутих підходів, наведено в табл. 1.

Далі в цій роботі пропонується виконати порівняльний аналіз підходів до визначення параметрів бортового ЄНЕ на прикладі конкретного типу електрорухомого складу для заданих умов його експлуатації. Як склад прийнято модернізований поїзд метрополітену, що являє собою п'ятивагонний зчеп з асинхронним тяговим приводом і системами рекуперації, у якого головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні. Поїзд складається з вагонів моделей 81-7080, 81-7081, 81-7081-01 (рис. 1).

Технічні характеристики поїзда метрополітену та параметри тягової передачі наведено в табл. 2.

Таблиця 1

Результати порівняльного аналізу підходів

Підхід/метод досліджень	Критерій для здійснення порівняльного аналізу					
	Рівень складності виконання досліджень	Фінансова складова досліджень (витрати)	Можливість урахування реальних умов експлуатації	Метод оцінювання параметрів бортового ЄНЕ	Можливість визначення раціональних параметрів	Універсальність підходу, урахування техніко-економічної складової та масогабаритних показників системи накопичення
1	2	3	4	5	6	7
Перший підхід/теоретичний або експериментально-розрахунковий	Простий	Середні	Враховує реальні умови експлуатації	За максимальними значеннями потужності та енергоємності енергії рекуперації	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Другий підхід (I)*/теоретичний або експериментально-розрахунковий	Простий	Незначні	Оцінка є досить грубою і не враховує низки факторів, зокрема профілю колії, графіка руху тощо	За оцінюванням кількості кінетичної енергії складу під час гальмування з максимальної швидкості	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Другий підхід (II)*/експериментально-розрахунковий	Простий	Середні	Не враховуються деякі реальні умови експлуатації (зміна завантаження, наявність комбінованого гальмування)	За оцінюванням кількості кінетичної енергії складу (за аналізом графіка кількості енергії рекуперативного гальмування складу від швидкості початку гальмування)	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Третій підхід/ теоретичний	Простий	Незначні	Не враховано реальні умови експлуатації (профіль колії, графік руху, наявність електропневматичного гальмування), а також існують обмеження у сфері застосування	Шляхом застосування основних положень теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування за умов обмеження струму споживання з контактної мережі (за технічними характеристиками електро-рухомого складу)	Відсутня	Підхід не є універсальним, обмеження у сфері застосування, передбачає визначення енергоємності бортового ЄНЕ тільки для рухомого складу з частотно-регульованим тяговим асинхронним електроприводом, не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Четвертий підхід/ експериментально-розрахунковий	Середній	Значні	Ураховує реальні умови експлуатації	Шляхом використання основних положень теорії імовірності (за аналізом характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування)	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
П'ятий підхід/ теоретичний	Середній	Незначні	Не враховано реальні умови експлуатації (профіль колії, графік руху, наявність комбінованого гальмування), а	Шляхом використання чисельних розрахунків з використанням основних положень теорії	Відсутня	Підхід не є універсальним, обмеження у сфері застосування, передбачає визначення енергоємності бортового ЄНЕ тільки для тягових

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
			також існують обмеження у сфері застосування	електричної тяги та електротехніки		одиниць з двигунами постійного струму послідовного збудження, не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Шостий підхід/ теоретичний	Середній	Незначні	Ураховує реальні умови експлуатації	Шляхом використання методів математичного і комп'ютерного моделювання (за середніми значеннями потужності та енергоємності)	Відсутня	Підхід є універсальним, але не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення
Сьомий підхід/ експериментально-розрахунковий	Складний	Значні	Ураховує реальні умови експлуатації	За результатами аналізу характеристик (діаграм) терміну окупності обраних систем накопичення залежно від потужності та енергоємності бортового СЧЕ	За критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення	Підхід є універсальним, враховує техніко-економічну складову, але не враховує масогабаритні показники системи накопичення
Восьмий підхід/ експериментально-розрахунковий	Складний	Значні	Ураховує реальні умови експлуатації	Вирішення двокритеріальної задачі за методом головного критерію. Спочатку розв'язується задача визначення обмеження за масою, а потім виконується пошук рішен-	За двома важливими критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення	Підхід є універсальним, враховує техніко-економічну складову та показники маси системи накопичення, не враховує габарити системи накопичення

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
				ня за головним критерієм – мінімальним терміном окупності		
Дев'ятий підхід/теоретичний	Складний	Незначні	Ураховує реальні умови експлуатації	Шляхом застосування спеціалізованої комп'ютерної програми для моделювання руху електрорухомого складу. Визначення параметрів за двома критеріями – масою та мінімальним терміном окупності	За двома важливими критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення	Підхід є універсальним, ураховує техніко-економічну складову та показники маси системи накопичення, не враховує габарити системи накопичення
Десятий підхід/теоретичний	Складний	Незначні	Ураховує реальні умови експлуатації	Шляхом застосування спеціалізованої комп'ютерної програми для моделювання руху електрорухомого складу. Визначення параметрів за трьома критеріями	За трьома важливими критеріями – обмеженням за масою, об'ємом і мінімальним терміном окупності системи накопичення	Підхід є універсальним, ураховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення. Спеціалізована програма дає змогу визначити раціональний режим ведення електрорухомого складу за заданим часом руху та мінімальним споживанням електроенергії з мережі

Примітка*. Другий підхід з позначкою I передбачає визначення параметрів бортового СНЕ за залежністю кількості енергії рекуперативного гальмування електрорухомого складу від максимально можливої швидкості початку гальмування складу (за технічними характеристиками поїзда); з позначкою II – за залежністю кількості енергії рекуперативного гальмування поїзда від найчастішої швидкості початку гальмування електрорухомого складу на заданій ділянці (за відомих умов експлуатації складу).



Рис. 1. Зовнішній вигляд дослідного поїзда метрополітену

Таблиця 2

Технічні характеристики поїзда метрополітену та тягової передачі

Номер з/п	Параметр	Значення
1	Маса поїзда метрополітену m , т – у порожньому стані; – за номінального завантаження; – максимального завантаження	155,3 246,9 262
2	Зчіпна вага моторного вагона $G_{зч}$, кН – у порожньому стані; – за номінального завантаження; – максимального завантаження	312,0 494,4 543,5
3	Кількість вагонів Q , шт.	5
4	Конструкційна швидкість V_k , км/год	90
5	Максимальна експлуатаційна швидкість V , км/год	80
6	Діаметр колеса D_k , м	0,825
7	Напруга на струмоприймачі вагона U_{st} , В – у режимі тяги; – режимі вибігу; – режимі гальмування	825 875 908
8	Коефіцієнт інерції обертових мас $(1+\gamma)$ – у порожньому стані; – за номінального завантаження; – максимального завантаження	1,1 1,08 1,06
9	Передаточне число редуктора μ	6,95
10	Коефіцієнт корисної дії редуктора $\eta_{ред}$, %	98
11	Коефіцієнт корисної дії інвертора $\eta_{інв}$, %	96
12	Маса ТАД, не більше, $m_{дв}$, кг	700

Параметри тягових асинхронних двигунів (ТАД), встановлених на модернізованому поїзді метрополітену, такі: $P_n = 150$ кВт; $U_n = 610$ В; $I_n = 185$ А; $n_n = 1900$ об/хв; $f_n = 65$ Гц; $M_n = 2,21$ кН · м. Графіки залежностей сили тяги та гальмування від швидкості цього поїзда зображено на рис. 2. Характеристику основного опору руху поїзда наведено на рис. 3. Графік кількості електроенергії

рекуперації поїзда від швидкості руху зображено на рис. 4.

Як задані умови експлуатації обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Дослідження та порівняльний аналіз виконано з урахуванням типових штатних умов експлуатації поїзда протягом доби.

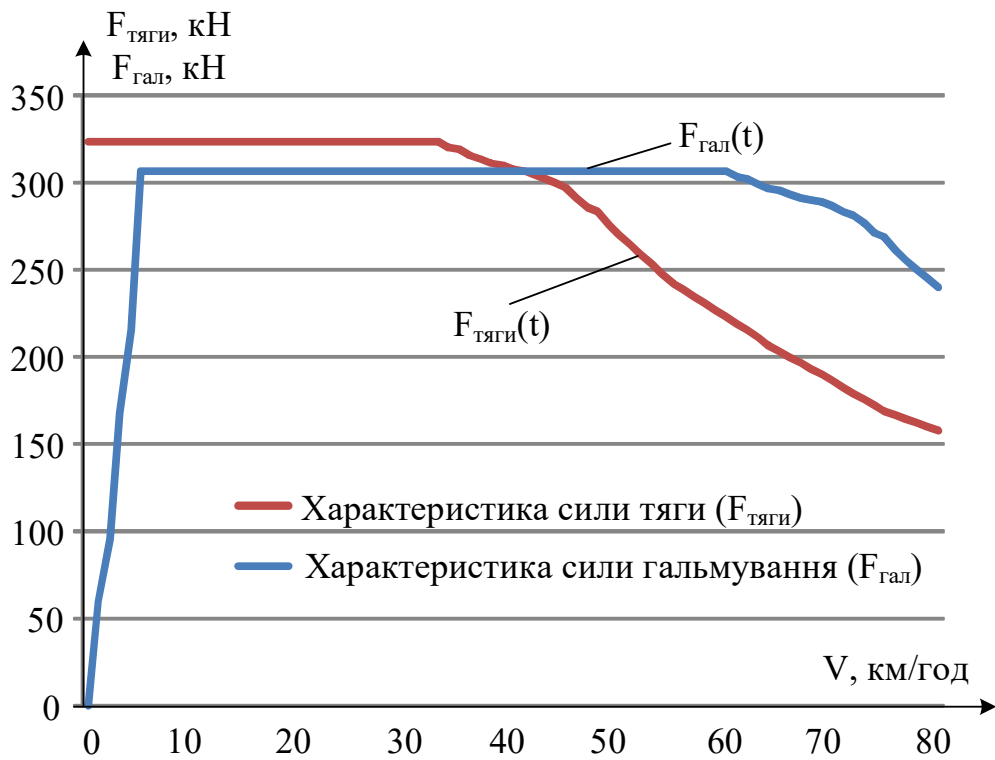


Рис. 2. Графіки залежностей сили та гальмування від швидкості руху

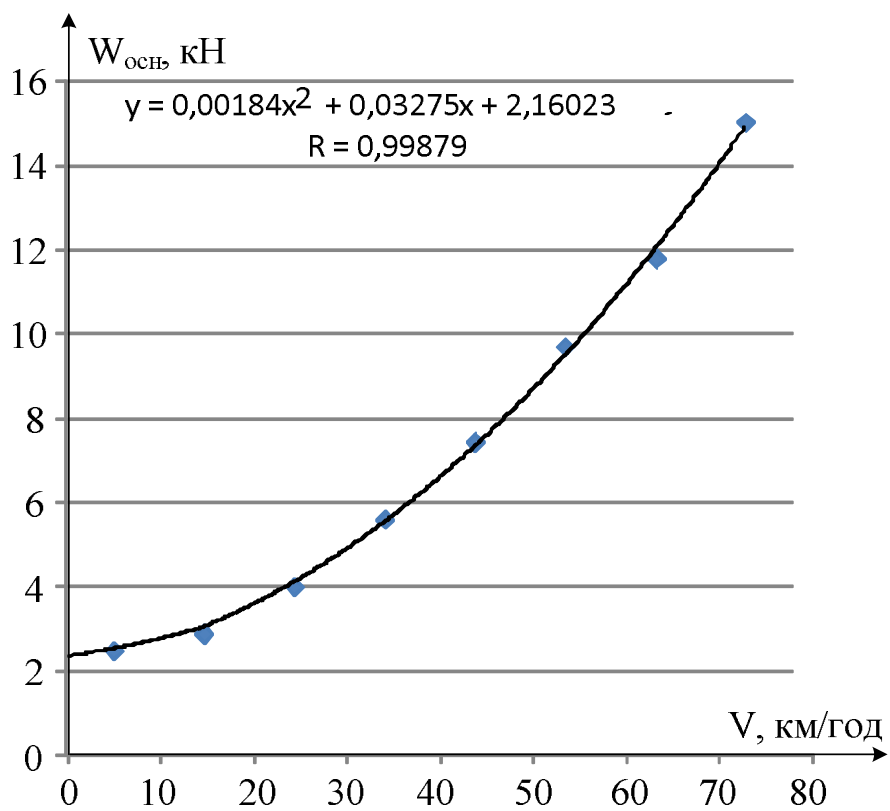


Рис. 3. Характеристика основного опору руху поїзда метрополітену

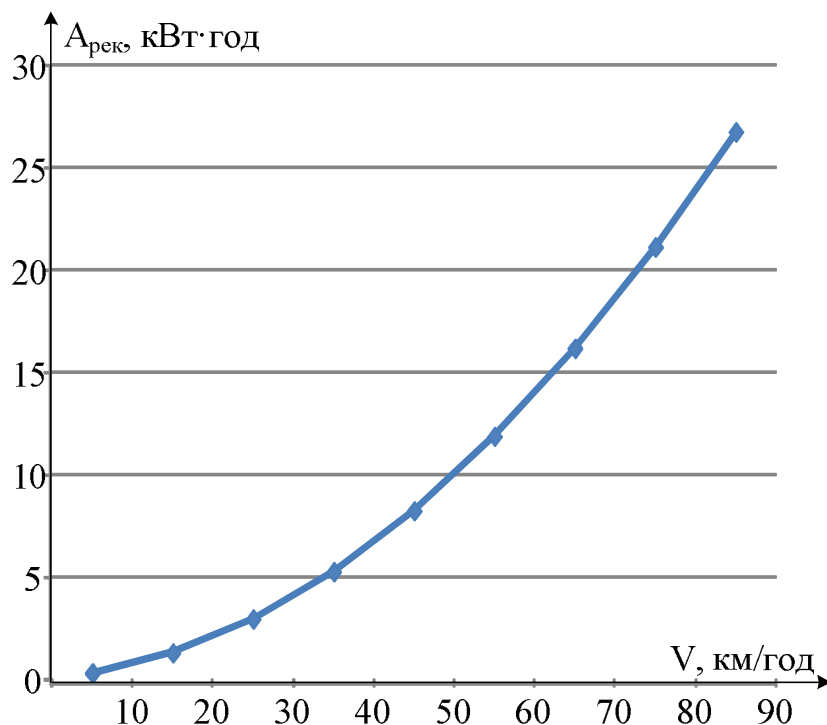


Рис. 4. Графік кількості електроенергії рекуперації поїзда від швидкості руху

Відповідно до технічної документації на обраний рухомий склад [22, 23] обмеження за об'ємом складає $1,5 \text{ м}^3$.

Підходи, що передбачають теоретичні методи досліджень, переважно реалізуються через проведення аналітичних розрахунків, побудову діаграм, графіків і залежностей. Деякі з теоретичних досліджень передбачають моделювання реальних типових штатних умов експлуатації електрорухомого складу за допомогою спеціалізованих комп'ютерних моделей. Більш детально принцип визначення параметрів бортових ЄНЕ за теоретичними методами досліджень описано у вищезазначених роботах. Масиви даних, отримані в процесі комп'ютерного моделювання, у подальшому піддаються математичній обробці.

Підходи, що передбачають застосування експериментально-розрахункових досліджень, реалізовано з використанням дослідного комплексу, до складу якого входить вищезазначений поїзд

і вимірювальна система, встановлена на його борту (рис. 5).

На блок-схемі (рис. 5) прийнято такі позначення силової частини поїзда: комплектація $3M+2T$, автоматичний вимикач (АВ), струмоприймач (СП), блок власних потреб (БВП), асинхронний тяговий двигун (АТД), статичний тяговий перетворювач (СТП), блок резисторів (БР), головний вимикач (ГВ), швидкодіючий вимикач (ШВ). Вимірювальна система розроблена спеціалістами науково-дослідної групи електричного та тягово-енергетичного обладнання Державного підприємства «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» (ДП «УкрНДІВ») для дослідження енергетичних процесів між контактною мережею та поїздом у реальних умовах його експлуатації. До складу вимірювальної системи входять персональний комп'ютер (ПК), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), блок комутації (БК), блок узгодження (БУ) і вимірювальні датчики (ДС1-ДС11, ДН1-ДН5, ДШ). Вимірювальна

система передбачає отримання, відображення та збереження даних,

отриманих від вимірювальних датчиків, встановлених на дослідному поїзді.

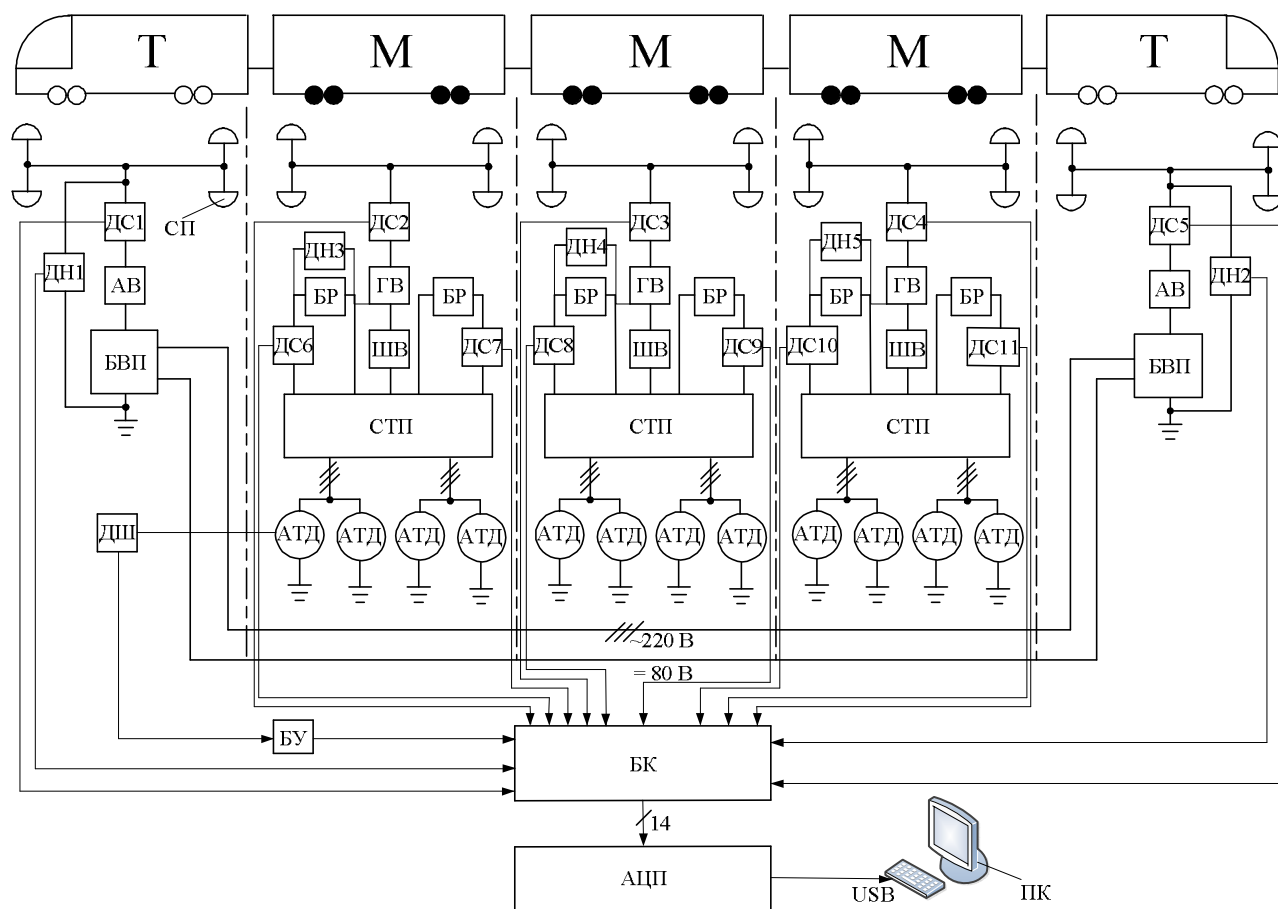


Рис. 5. Блок-схема експериментального випробувального комплексу

Більш детально принципи визначення параметрів бортових ЄНЕ, отриманих експериментально-розрахунковим шляхом, розглянуто у вищенаведених роботах.

Для штатних типових умов експлуатації поїзда під час його різного завантаження виконано дослідження енергетичних процесів. Прийнято, що поїзд експлуатується так:

– у робочі дні (5 днів на тиждень) три та два повних кола з дотриманням «непікового» графіка руху відповідно при номінальному та максимальному завантаженні; одне та два повних кола з дотриманням «пікового» графіка руху відповідно при номінальному та

максимальному завантаженні; одне повне коло з дотриманням «непікового» графіка руху при мінімальному завантаженні;

– у вихідні дні (2 дні на тиждень) два, сім та одне повних кола з дотриманням «непікового» графіка руху відповідно при мінімальному, номінальному та максимальному завантаженні.

– за рік поїзд експлуатується 315 днів, з яких 225 робочих і 90 вихідних.

За результатами цих досліджень з використанням вимірювальної системи 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 $i_R(t)$, швидкість руху поїзда $v(t)$. У подальшому отримані масиви даних піддавались обробці.

За результатами обробки масивів даних (осцилограм), отриманих експериментальним шляхом на заданій ділянці, 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 ($U_{\text{сер.R}}$); середнє значення струму, що розсіюється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах у режимі рекуперативного гальмування ($I_{\text{сер.R}}$); час руху в режимах тяги та рекуперативного гальмування ($t_{\text{тяги}}$, $t_{\text{рек.}}$), швидкість початку гальмування ($V_{\text{гал}}$), а також середня експлуатаційна швидкість на перегоні ($V_{\text{сер.екс}}$).

За визначеними значеннями величин 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 до контактної мережі ($A_{\text{рек}}$); кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (A_R); середнє та максимальнє значення потужності в режимах рекуперативного гальмування ($P_{\text{сер}}$, P_{max}).

Кількість електроенергії, що споживається в режимах тяги, розраховано за формулою [24, 25]

$$A_{\text{тяги}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (1)$$

Кількість електроенергії, що генерується до контактної мережі, розраховується за формулою [26]

$$A_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{сер.рек}} \cdot I_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек.}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (2)$$

Кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (надлишкова енергія), розраховується за формулою [25, 26]

$$A_R = \frac{U_{\text{сер.R}} \cdot I_{\text{сер.R}} \cdot t_{\text{рек.}}}{3600 \cdot 1000}. \quad (3)$$

Середня потужність електроенергії рекуперативного гальмування визначається за виразом [11]

$$P_{\text{сер}} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N P_k = \frac{1}{N} \cdot \sum_{k=1}^N U_k \cdot I_k, \quad (4)$$

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 $i(t)$.

Максимальнє значення потужності електроенергії рекуперативного гальмування визначається за результатом аналізу осцилограм $u(t)$ та $i(t)$ з урахуванням прийнятої частоти дискретизації запису цих сигналів. Визначення максимального значення потужності електроенергії рекуперативного гальмування можна описати математичним виразом [18]

$$P_{\text{max}} = \left(\begin{matrix} P_{k1} \\ P_{k2} \\ \dots \\ P_{kN} \end{matrix} \right) \rightarrow \text{max}. \quad (5)$$

За результатами обробки масивів даних (осцилограм), отриманих при виконанні теоретичних досліджень (комп'ютерного моделювання), розраховано такі показники: кількість

спожитої електроенергії в режимах тяги ($A_{\text{тяги}}$); кількість електроенергії, що генерується поїздом під час рекуперативного гальмування ($A_{\text{рек}} + A_{\text{R}}$); середнє та максимальне значення потужності в режимах рекуперативного гальмування ($P_{\text{сер}}$, P_{max}).

Для кожного з розглянутих підходів визначено такі показники: значення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ, термін окупності, маса і об'єм обраної системи накопичення, кількість заощадженої електроенергії, відношення маси системи накопичення до маси поїзда в порожньому та максимально завантаженому стані, прискорення поїзда під час розгону з урахуванням розміщення системи накопичення на борту, погіршення динамічних показників поїзда під час розгону.

Значення потужності ($P_{\text{ЄНЕ}}$) та енергоємності ($A_{\text{ЄНЕ}}$) бортового ЄНЕ розраховуються на основі вищезгаданих підходів. Термін окупності ($T_{\text{ок}}$), масу ($m_{\text{ЄНЕ}}$), об'єм ($V_{\text{ЄНЕ}}$) обраної системи накопичення розраховано з урахування того, що система накопичення складається з бортового ЄНЕ, реверсивного силового перетворювача, системи керування енергообмінними процесами, металоконструкції, елементів системи вентиляції, датчиків струму та напруги [18, 19]. Під час досліджень прийнято, що бортовий ЄНЕ зібраний з конденсаторних модулів типу ЕК404 виробництва ЗАТ «ЕЛТОН». Термін окупності системи накопичення визначається за виразом [18]

$$T_{\text{ок}} = \frac{Q_{\text{ЄНЕ}}}{T_e \cdot E_r}, \quad (6)$$

де Q – вартість системи накопичення, грн;
 T_e – тариф на електроенергію, грн/кВт·год;
 E_r – кількість заощадженої електроенергії за рік за рахунок впровадження системи накопичення, кВт·год.

При цьому $T_e = 3,42$ грн/кВт·год.

Кількість заощадженої електроенергії за рік визначається за формулою [18]

$$E_r = l_1 \cdot E_{d1} + l_2 \cdot E_{d2}, \quad (7)$$

де l_1 , l_2 – кількість робочих і вихідних днів на рік;

E_{d1} , E_{d2} – кількість заощадженої електроенергії в робочий і вихідний дні відповідно, кВт·год.

Маса та об'єм системи накопичення розраховувались з урахуванням того, що необхідне значення робочої напруги, потужності та енергоємності формувались шляхом послідовно-паралельного з'єднання зазначених конденсаторних модулів. Під час досліджень з оцінювання кількості заощадженої електроенергії прийнято, що коефіцієнт використання електроенергії за цикл «зарядження–накопичення–розрядження» складає 0,86.

Кількість заощадженої електроенергії розраховується за формулою [18]

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

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

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

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

де $m_{\text{ЄНЕ}}$ – 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

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

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

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

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

Результати досліджень зазначених показників для обраних систем накопичення за різними підходами, наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Результати досліджень при застосуванні різних підходів

Підхід	Параметр дослідження							
	Потужність бортового СНЕ, МВт	Енергоємність бортового СНЕ, кВт·год	Термін окупності системи накопичення, роки*	Маса системи накопичення, т	Об'єм системи накопичення, м ³	Кількість заощадженої електроенергії, %	Відношення маси системи накопичення до маси поїзда, %	Прискорення поїзда під час розгону, м/с ² /погіршення динамічних показників поїзда, %**
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Перший підхід	3,88	45,09	> 50	56,5	50,4	34,7	21,6–33,7	1,00***/19,4
Другий підхід (I)	3,9	26,7	> 30	34,6	31,0	32,7	13,2–23,1	1,08***/12,9
Другий підхід (II)	3,08	8,0	8,5	9,6	8,6	27,4	3,7–6,4	1,19***/4,0
Третій підхід	1,5	3,5	4,6	4,7	4,2	19,6	1,8–3,1	1,21***/2,4
Четвертий підхід	3,88	4,84	7,1	6,3	5,6	23,0	2,4–4,2	1,2***/3,2
П'ятий підхід****	–	–	–	–	–	–	–	–
Шостий підхід	1,02	5,02	5,6	5,1	4,5	20,3	1,9–3,4	1,21***/2,4
Сьомий підхід	1,0	3,0	5,2	3,1	2,8	16,1	1,2–2,1	1,22***/1,6

Продовження табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Восьмий підхід	1,0	3,0	5,2	3,1	2,8	16,1	1,2–2,1	1,22***/1,6
Дев'ятий підхід	0,8	1,7	3,2	1,6	1,4	11,4	0,6–1,1	1,23***/0,8
Десятий підхід	0,8	1,7	3,2	1,6	1,4	12,0	0,6–1,1	1,23***/0,8

Примітки: *Вартість систем накопичення в розрахунках прийнято з урахуванням курсу іноземної валюти станом на 25.01.2022 р.

**Показники погіршення динаміки руху поїзда та прискорення під час його розгону визначаються за умови незмінного значення пускової сили тяги без та з розміщенням бортового ЄНЕ на поїзді.

*** Значення прискорення поїзда під час розгону розраховано для номінального завантаження. Нормативне значення цього показника має бути не менше $1,2 \text{ м/с}^2$ [27].

**** П'ятий підхід має обмежену сферу застосування і його неможливо застосувати для визначення параметрів бортового ЄНЕ на електрорухомому складі з асинхронним тяговим приводом.

Результати порівняльного аналізу підходів (табл. 1) і досліджень параметрів систем накопичення за умов застосування цих підходів (табл. 3) дозволив встановити таке:

– перший і другий (I) підходи засновані на використанні бортового ЄНЕ значної потужності та енергоємності, здатного накопичувати повний об'єм електроенергії рекуперації поїзда. При цьому термін окупності систем накопичення за цими підходами складає понад 30 років, маса – понад 34 т, об'єм – понад 30 м^3 . Ці системи також мають значний вплив на динаміку розгону поїзда, тому потрібне використання більш потужного тягового електропривода для виконання нормативних вимог за прискоренням ($\geq 1,2 \text{ м/с}^2$) [27], що призведе до додаткового збільшення терміну окупності такого поїзда. Системи накопичення з зазначеними параметрами можна розмістити тільки на окремому вагоні поїзда. Як наслідок, системи накопичення з визначеними параметрами за зазначеними підходами недоцільно розміщувати на поїзді за терміном окупності та масогабаритними показниками;

– другий підхід (II) є простим у застосуванні, універсальним, потребує середніх фінансових витрат, не враховує

деяких реальних умов експлуатації, техніко-економічну складову та обмеження за масогабаритними показниками. Для заданих умов експлуатації поїзда при застосуванні цього підходу термін окупності для цієї системи складає близько 9 років, маса – 9,6 т, об'єм – $8,6 \text{ м}^3$. Ця система порівняно з попередніми має значно менші показники терміну окупності та масогабаритні показники, проте значення цих показників є значними. При використанні такої системи на поїзді не будуть виконуватись нормативні вимоги за прискоренням під час розгону поїзда. Отже, розміщення цієї системи накопичення є недоцільним за декількома важливими показниками;

– третій, четвертий, шостий підходи засновані на визначенні параметрів за теоретичними та експериментально-розрахунковими методами досліджень. Третій підхід заснований на визначенні параметрів шляхом застосування основних положень електричної тяги та чисельних методів інтегрування за умов обмеження струму споживання з контактної мережі; четвертий – на використанні основних положень теорії імовірності за аналізом характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування; шостий – на використанні методів математичного

моделювання за середніми значеннями потужності та енергоємності. Для заданих умов експлуатації поїзда залежно від застосування того чи іншого підходу термін окупності для цих систем складає від 4,6 до 7,1 року, маса – від 4,7 до 6,3 т, об'єм – від 4,2 до 5,6 м³. Отже, термін окупності цих систем накопичення доволі незначний, а для системи накопичення, визначеної за третім підходом, навіть складає менше 5 років. Масагабаритні показники цих систем задовольняють нормативні вимоги за прискоренням під час розгону поїзда, тому їхній вплив на динаміку розгону незначний. Загальним недоліком цих підходів є те, що вони не враховують техніко-економічну складову та обмеження за масогабаритними показниками для систем накопичення. У цілому використання систем накопичення з параметрами, визначених за третім, четвертим або шостим підходами, є цілком можливим, оскільки термін окупності цих систем порівняно незначний і їхній вплив на динаміку розгону поїзда задовольняє нормативні вимоги;

– п'ятий підхід заснований на використанні чисельних розрахунків з використанням теоретичних основ електричної тяги та електротехніки. Цей підхід має обмеження у сфері застосування, передбачає визначення енергоємності бортового ЄНЕ тільки для тягових одиниць з двигунами постійного струму послідовного збудження, не враховує техніко-економічну складову, масогабаритні показники системи накопичення. Тому визначення параметрів бортового ЄНЕ в цьому випадку для поїзда з асинхронним тяговим приводом не було можливим;

– сьомий, восьмий, дев'ятий, десятий підходи дозволяють визначати раціональні параметри систем накопичення за одним або відразу декількома критеріями оцінювання. Сьомий підхід передбачає визначення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ за критерієм мінімального терміну окупності системи накопичення.

Восьмий і дев'ятий підходи передбачають визначення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ за двома важливими критеріями – обмеженням за масою та мінімальним терміном окупності системи накопичення. Десятий підхід передбачає визначення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ за трьома важливими критеріями – обмеженням за масою, об'ємом і мінімальним терміном окупності системи накопичення. Для заданих умов експлуатації поїзда залежно від застосування того чи іншого підходу термін окупності для цих систем складає від 3,2 до 5,2 року, маса – від 1,6 до 3,1 т, об'єм – від 1,4 до 2,8 м³. Отже, термін окупності цих систем мінімальний, їхні масогабаритні показники мінімальні порівняно з попередніми системами, що дозволяє мінімально впливати на динаміку розгону поїзда. Головна перевага цих підходів – можливість визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ за одним або декількома критеріями оцінювання. Отже, найбільш доцільним як з технічної, так і економічної точки зору є розміщення систем накопичення, визначених за цими підходами. Особливий інтерес має визначення параметрів за десятим підходом, оскільки він дозволяє обґрунтувати раціональний вибір системи накопичення відразу за трьома важливими критеріями (мінімальною вартістю, обмеженням за масою і об'ємом).

Висновки. Узагальнений порівняльний аналіз існуючих підходів на підставі проведених досліджень дозволив встановити таке:

– найбільш простими є підходи, за яких застосовується потужний та енергоємний накопичувач, здатний зберігати і повторно використовувати повний об'єм електроенергії рекуперативного гальмування електродвигуна 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 електрорухомому складі доцільним є застосування бортового ЄНЕ незначної потужності та енергоємності;

– існують підходи, що дозволяють швидко отримати результат щодо визначення параметрів бортових ЄНЕ та не потребують проведення складних і тривалих досліджень, однак вони не дозволяють урахувати різні фактори реальних умов експлуатації електрорухомого складу;

– підходи, засновані на використанні даних експериментальних досліджень, потребують значних фінансових ресурсів і часу, проте вони дозволяють враховувати реальні умови експлуатації електрорухомого складу;

– наразі найбільшого розвитку отримали підходи, у яких здійснюється вибір раціональних параметрів бортових ЄНЕ з використанням теоретичних

досліджень за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм. Ці програми дозволяють з достатньою точністю відтворювати процеси реальної експлуатації рухомого складу і значно зекономити фінансові ресурси та зменшити витрати часу на проведення таких досліджень;

– найбільш доцільним є визначення параметрів бортового ЄНЕ за багатокритеріальним підходом, оскільки він має ряд переваг порівняно з іншими та дозволяє обґрунтувати вибір раціональних параметрів за трьома важливими критеріями оцінювання – обмеженням за масою і об'ємом, а також мінімальним терміном окупності системи накопичення.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування електрорухомого складу за рахунок розвитку теорії визначення параметрів бортового ЄНЕ та будуть корисними напрацюваннями під час створення інноваційного електрорухомого складу.

Список використаних джерел

1. 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.
2. Wiczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. *TTS Technika Transportu szynowego*. 2018. № 10. P. 39–43.
3. Рыбалко А. Я., Дыбрин С. В. Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008. № 8. С. 356–361.
4. Сулим А. О., Хозя П. О., Мельник О. О. Застосування бортових ємнісних накопичувачів незначної потужності та енергоємності на рухомому складі метрополітену. *Вісник Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля*. 2020. № 4(260). С. 87–92. doi: 10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92.
5. 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.

6. 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. № 1. С. 15–20.
7. 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.
8. Ratniyomchai T., Hillmarsen S., Tricoli P. Recent developments and applications of energy storage devices in electrified railways. *ET Electr. Syst. Transp.* 2014. Vol. 4. № 1. P. 9–20.
9. 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*. Харків: НТУ «ХП», 2013. № 1. С. 41–49.
10. 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»*. Харків: НТУ «ХП», 2015. № 6 (1115). С. 132–137.
11. 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.
12. Sulym, A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of On-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk NHU*. Dnipro, 2018. Is. 5. P. 79–87. URL: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>.
13. 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 ім. В. Лазаряна*. 2017. № 5 (71). С. 48–60. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624>.
14. 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*. 2019. Vol. 9. No. 2 P. 848–858.
15. Szênâsy I. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. *Acta Technica Jaurinensis*. 2009. Vol. 2. № 1. P. 117–131.
16. Мятѣж А. В., Ярославцев М. В. Определение энергоемкости бортового буферного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта. *Транспорт Российской Федерации. Электроснабжение и электротехника*. 2013. № 4 (47). С. 62–65.
17. 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. Is. 2 (92). P. 63–71. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>.
18. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Palant O., Stamatina 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. Is. 3 (102). P. 28–38. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>.
19. Сулим А. О., Хозя П. О. Удосконалення методології визначення раціональних параметрів ємнісного накопичувача енергії для поїзда метрополітену. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп.* 2020. № 5(89). С. 45–67. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2020/218603>.
20. Radu P. V., Szlag A., Steczek M. On-board energy storage devices with supercapacitors for metro trains – case study analysis of application effectiveness. *Energies*. 2019. Vol. 12 (7). 1291. P. 1–22. URL: <https://doi.org/10.3390/en12071291>.

21. 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, Republic of Latvia, 2021. P. 50-54. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-172-5-13>.

22. 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 / ДП «УкрНДІВ» ; керівник Хозя П. О.; викон. Донченко А. В., Речкалов С. Д., Шмаков С. В. [та ін.]. Кременчук, 2014. 154 с. ДР 0114U006350. Інв. № 1501.

23. ТУ У 30.2-05763814-111:2014. Вагони метрополітену моделей 81-7080 та 81-7081. Комплексна модернізація з впровадженням асинхронного тягового приводу. Технічні умови. Київ, 2014. 95 с.

24. Теория электрической тяги / В. Е. Розенфельд, И. П. Исаев, Н. Н. Сидоров, М. И. Озеров; под ред. И. П. Исаева. Москва: Транспорт, 1995. 294 с.

25. Слепцов М. А., Долаберидзе Г. П., Прокопович А. В. Основы электрического транспорта: учеб. для студ. высш. учеб. заведений. Москва: Издательский центр «Академия», 2006. 464 с.

26. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» / А. В. Донченко, С. О. Мужичук, А. О. Сулим та ін. *Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад»*. Кременчук, 2015. Вип. 12. С. 48–56.

27. 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.

Сулим Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, старший дослідник, заступник директора з наукової роботи, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування». ORCID iD: 0000-0001-8144-8971. Тел.: 096-799-01-58. E-mail: sulim1.ua@gmail.com.

Sulym Andrii Oleksandrovych, PhD (Engineering), senior scientist, Professor, Deputy Director for scientific work, State Enterprise «Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute». ORCID iD: 0000-0001-8144-8971. Tel.: 096-799-01-58. E-mail: sulim1.ua@gmail.com.

Статтю прийнято 26.11.2022 р.