

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

УДК 625.42:[621.333.4:621.311.6]

А. О. СУЛИМ<sup>1\*</sup>, П. О. ХОЗЯ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування» (ДП «УкрНДІВ»), вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (05366) 6 03 54, ел. пошта sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971

<sup>2</sup>Науково-дослідна лабораторія експериментальних досліджень залізничної техніки, ДП «УкрНДІВ», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (05366) 6 20 43, ел. пошта pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПОЇЗДА МЕТРОПОЛІТЕНУ

**Мета.** За основну мету автори ставлять визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ) з використанням комплексного підходу оцінки параметрів, в основу якого покладено методи теоретичних досліджень. **Методика.** Виконано порівняльний аналіз наявних методологій та підходів до визначення параметрів бортових ємнісних накопичувачів для поїзда метрополітену із системами рекуперації, сформульовано переваги й недоліки кожного з них. Установлено, що серед цих методологій найбільш доцільно використовувати комплексний підхід, суть якого полягає у визначенні раціональної потужності та енергоємності одразу за двома параметрами системи накопичення – масою та терміном окупності. Запропоновано процедуру для визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії з використанням таких методів досліджень: теоретичних основ електричної тяги, математичного моделювання динаміки руху та енергетичних процесів, математичної статистики, техніко-економічного та порівняльного аналізів. **Результати.** Проведений комплекс теоретичних досліджень дозволяє підтвердити економічну доцільність упровадження бортових ємнісних накопичувачів енергії на поїзді метрополітену. Визначено систему накопичення з раціональними параметрами ЄНЕ для заданих умов експлуатації в комунальному підприємстві «Київський метрополітен» та для обраного дослідного поїзда метрополітену. Оцінено кількість заощадженої електроенергії за рахунок упровадження такої системи. **Наукова новизна.** Удосконалено методологію визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії в частині заміни використання даних експериментальних досліджень теоретичними дослідженнями, суть яких полягає в моделюванні руху поїзда метрополітену із системами рекуперації за допомогою програмного забезпечення, що дозволить зменшити фінансові витрати, час на виконання досліджень та підвищить їх точність. Отримали подальший розвиток дослідження з визначення кількісних показників електроенергії рекуперації для аналізу резервів енергозбереження в метрополітені. **Практична значимість.** Результати теоретичних досліджень можуть стати основою для створення натурних зразків поїздів метрополітену з бортовими ємнісними накопичувачами енергії. Проведені дослідження дозволять створити рекомендації щодо проектування інноваційних енергоощадних поїздів метрополітену з поліпшеними техніко-економічними характеристиками, які здатні підвищити ефективність функціонування перевізного процесу в метрополітені.

**Ключові слова:** бортовий ємнісний накопичувач енергії (ЄНЕ); конденсаторний модуль; поїзд метрополітену; система накопичення; система рекуперації

## Вступ

В останні роки фірми США, Японії, Кореї, країн Європейського Союзу, а також вітчизняні виробники суттєво підвищили електроенергетичні характеристики ємнісних накопичувачів енергії (ЄНЕ), які ще називають суперконденсатори, ультраконденсатори, іоністори, двошарові електрохімічні конденсатори. Це стало поштовхом для проведення чималої кількості досліджень з їх практичного використання як джерел живлення, зокрема і в метрополітені для зберігання електроенергії рекуперативного гальмування та її повторного використання тяговим електроприводом під час розгону поїзда. При цьому одним із маловивчених та актуальних питань залишається визначення необхідних параметрів бортового ЄНЕ для поїзда метрополітену [15–18, 21, 22].

Ця стаття є продовженням циклу наявних досліджень [2–4, 7, 8, 12, 13, 20], у яких розглянуто питання визначення параметрів бортового ЄНЕ, зокрема його потужності та енергоємності. У зазначених роботах визначення параметрів запропоновано виконувати як із використанням теоретичних досліджень, так і за результатами аналізу даних експериментальних досліджень енергетичних процесів між контактною мережею та тяговим електроприводом у штатних умовах експлуатації рухомого складу. В основу цих досліджень покладено такі методи та основні положення: положення теорії електричної тяги та чисельних методів інтегрування, методи аналізу характеристик щільності розподілу потужності та кількості електроенергії рекуперативної, положення теорії ймовірності, теоретичні основи електротехніки та інші. Однак за результатами аналізу робіт [5, 14, 19] відомо, що ці методи та основні положення не дозволяють у повній мірі враховувати ряд факторів реальних умов експлуатації, основними серед яких є: профіль колії, завантаженість вагонів, зміна графіка руху поїзда протягом доби, наявність комбінованого гальмування. Загальним недоліком запропонованих методів та підходів у роботах [2–4, 7, 8, 12, 13, 20] є неможливість визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ. Більш детально аналіз переваг та недоліків кожного з методів описано в роботі [19].

У працях [5, 14] вибір параметрів бортового ЄНЕ запропоновано здійснювати за критерієм

мінімального терміну окупності систем накопичення. Під системою накопичення мається на увазі бортовий ЄНЕ, реверсивний статичний перетворювач та система керування енергообмінними процесами між бортовим ЄНЕ та тяговим електроприводом. Суть цього підходу полягає у визначенні параметрів за результатами аналізу діаграм терміну окупності обраних систем накопичення. Перевага застосування цього підходу полягає у визначенні раціональних параметрів бортового ЄНЕ. При цьому враховують реальні умови експлуатації поїзда метрополітену з системами рекуперативної рекуперативної. Недоліком підходу є визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ за одним критерієм – терміном окупності системи накопичення.

У роботі [19] запропоновано комплексний підхід до оцінки раціональних параметрів бортового ЄНЕ, який дозволяє здійснювати його вибір за двома важливими показниками системи накопичення – масою та терміном окупності. Цей підхід передбачає проведення експериментальних досліджень у реальних умовах експлуатації поїзда, причому дозволяє враховувати ті фактори, які не враховано у вищезазначених роботах.

Однак у комплексному підході, запропонованому в роботі [19], в основу якого покладено аналіз даних експериментальних досліджень, також наявні недоліки, головними з яких є значні витрати часу та фінансів. Ще один суттєвий недолік, який не дозволяє в повній мірі отримувати реальну картину, – це неможливість урахування зміни завантаження поїзда під час його експлуатації на лінії, оскільки організація таких досліджень за умов графікового руху є проблематичною. Як правило, під час експериментальних досліджень припускають, що за добу поїзд експлуатується з мінімальним, номінальним і максимальним завантаженням. І відповідно, такі дослідження зачасту виконують за штатної експлуатації поїзда для трьох режимів його завантаження. Отже, під час визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ шляхом використання даних експериментальних досліджень існує похибка, яка виникає через відсутність врахування зміни завантаженості поїзда під час експлуатації на лінії. Тому в цій роботі для зменшення фінансових витрат, часу на виконання досліджень та підвищення точності отриманих

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

маних результатів запропоновано визначити раціональні параметри бортового ЄНЕ за допомогою розробленої математичної моделі руху поїзда метрополітену з системами рекуперації.

**Мета**

За основну мету автори роботи ставлять визначення раціональної потужності та енергоємності бортового ЄНЕ з використанням комплексного підходу оцінки параметрів, в основу якого покладено методи теоретичних досліджень.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

– розробити комплексний підхід із визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ на основі використання математичної моделі руху поїзда, який дозволить враховувати масові та вартісні показники системи накопичення;

– визначити раціональні параметри бортового ЄНЕ для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену з використанням комплексного підходу;

– визначити кількість заощадженої електроенергії для заданих режимів ведення поїзда за рахунок упровадження системи накопичення з раціональними параметрами;

– визначити вплив обраної системи накопичення з раціональними параметрами бортового ЄНЕ на масу та динаміку розгону поїзда метрополітену.

**Методика**

Для вирішення поставлених завдань використано такі методи досліджень: теоретичні основи електричної тяги під час виконання тягових розрахунків, математичне моделювання динаміки руху та енергетичних процесів у штатних умовах експлуатації поїзда метрополітену із системами рекуперації, сучасні методи математичної статистики для обробки даних математичного моделювання, методи техніко-економічного аналізу для оцінки вартості систем накопичення, аналітичні методи досліджень для визначення кількості заощаджень за умов упровадження систем накопичення, методи порівняльного аналізу для визначення системи накопичення з раціональними параметрами за діаграмами терміну окупності від величин енергоємності та потужності.

Комплексний підхід до оцінки раціональних параметрів бортового ЄНЕ передбачає поетапну процедуру досліджень (рис. 1).

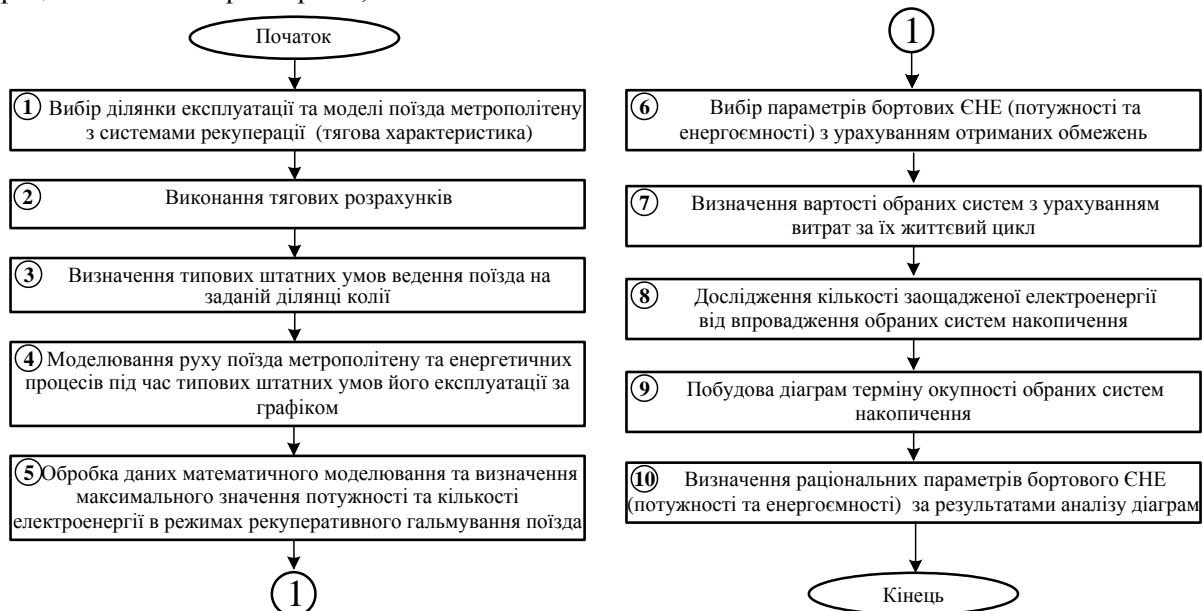


Рис. 1. Процедура визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ з використанням комплексного підходу

Fig.1. Procedure for determining the rational parameters of the onboard capacitive energy storage using an integrated approach

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Як було зазначено раніше, суть цього підходу полягає у визначенні раціональних параметрів одразу за двома параметрами системи накопичення – масою та терміном окупності. При цьому основною відмінністю від підходу в роботі [19] є те, що в основу цієї процедури покладено теоретичні дослідження, суть яких полягає в моделюванні руху поїзда метрополітену із системами рекуперації за допомогою програмного забезпечення.

Узагальнений математичний опис цільової функції комплексного підходу з визначення раціональних параметрів бортового ЄНЕ можна представити в такому 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, яку визначають за границями відповідних значень (параметричні обмеження);  $k$  – кількість прийнятих обмежень для пошуку оптимального рішення.

У нашому випадку основним критерієм оптимізації обрано термін окупності системи накопичення. З урахуванням обраного критерію сформулюємо задачу оптимізації: знайти такі значення потужності та енергоємності бортового ЄНЕ ( $P_{\text{ЄНЕ}}, A_{\text{ЄНЕ}}$ ), за яких:

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

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

За умов, якщо цільова функція має декілька мінімальних значень, обирають систему накопичення, яка здатна заощаджувати максимальну кількість електроенергії, тобто:

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

де  $j$  – кількість систем накопичення з однако-вим мінімальним терміном окупності;  $\alpha$  – кількість заощадженої електроенергії за рахунок упровадження системи накопичення.

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

## Результати

*Перший етап.* За дослідну обрано ділянку між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен». Дослідний рухомий склад являє собою п'ятивагонний поїзд з асинхронним тяговим приводом та системами рекуперації, у якому головні вагони – безмоторні, проміжні – моторні. Дослідження виконано для типових умов експлуатації поїзда із системами рекуперації протягом доби.

*Другий етап.* В основу тягових розрахунків покладено принципи вибору сили тяги (гальмування) з урахуванням обмежень за максимальним моментом двигуна, за зчепленням коліс з рейками, та забезпечення тяговими двигунами заданої динаміки руху поїзда. Алгоритм тягових розрахунків для визначення обмежень за масою наведено на рис. 2.

Розрахунок максимально допустимої сили тяги (гальмування) за перевантажувальними можливостями моменту на валу двигуна виконують за умови:

$$F_{\text{max}} \leq \frac{2 \cdot M \cdot \mu \cdot \eta_{\text{ред}} \cdot N_{\text{дв}}}{D}, \quad (4)$$

де  $M$  – максимальний момент на валу тягового двигуна, Н·м;  $\mu$  – передаточне число редуктора;  $\eta_{\text{ред}}$  – коефіцієнт корисної дії редуктора;  $D$  – діаметр колеса, м;  $N_{\text{дв}}$  – кількість тягових двигунів, шт.

Розрахунок максимально допустимої сили тяги (гальмування) за зчепленням коліс з рейками виконують за умови:

$$F_{\text{max}} \leq 1000 \cdot G_{\text{зч}} \cdot \psi, \quad (5)$$

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

де  $G_{зч}$  – сила тяжіння (зчіпна вага), яка припадає на обмоторену вісь поїзда, кН;  $\psi$  – розрахункове значення коефіцієнта зчеплення за нормальних умов.

Примітка. Розрахункове значення коефіцієнта зчеплення колеса з рейкою для поїзда метрополітену з асинхронним тяговим приводом за нормальних умов обирають на рівні 0,22 [1, 6].

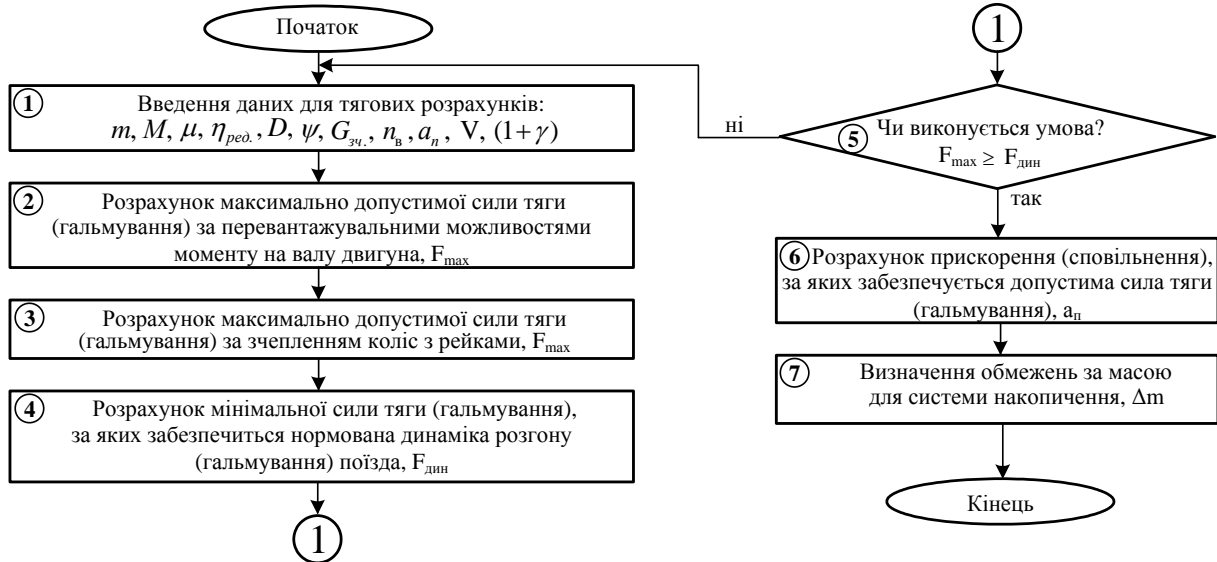


Рис. 2. Алгоритм тягових розрахунків

Fig.2. Traction calculation algorithm

Розрахунок необхідної сили тяги (гальмування), виходячи з вимог нормативної документації щодо значень середнього прискорення (сповільнення), виконують за умови [1, 6]:

$$F_{\text{дин}} \geq m \cdot (1 + \gamma) \cdot a + W, \quad (6)$$

де  $m$  – маса поїзда, т;  $(1 + \gamma)$  – коефіцієнт інерції обертальних мас поїзда;  $a$  – нормоване значення прискорення (сповільнення), м/с<sup>2</sup>;  $W$  – основний опір руху поїзда, кН.

Розрахунок основного опору руху поїзда виконують за формулою [1]:

$$W = \left( 1,1 + \frac{(0,09 + 0,022 \cdot n_v) \cdot V^2}{m} \right) \cdot G, \quad (7)$$

де  $n_v$  – кількість вагонів поїзда, шт;  $V$  – значення швидкості руху поїзда, км/год.

Розрахунок максимально допустимої сили тяги (гальмування) виконуються з урахуванням умов (1) – (3). У випадку, якщо максимально допустима сили тяги (гальмування) не відповідає жодній і наведених умов, розміщення ЄНЕ на поїзді неможливе тоді (необхідно збільшити число моторних осей поїзда метрополітену, об-

рати тягові двигуни з іншими параметрами тощо). В іншому випадку виконують розрахунок значення прискорення (сповільнення), при якому забезпечується допустима сила тяги (гальмування), за формулою:

$$a_n = \frac{F_{\text{max}} - W}{m(1 + \gamma)}. \quad (8)$$

При цьому для розрахунків беруть менше значення допустимої сили тяги ( $F_{\text{max}} \rightarrow \min$ ), виходячи із зазначених умов (4) та (5).

Визначення обмежень за масою виконують за формулою:

$$\Delta m \leq \frac{F_{\text{max}} - F_{\text{дин}}}{a \cdot (1 + \gamma)} \quad (9)$$

Чиним нормативним документом [9] встановлено вимоги до динаміки розгону (гальмування) поїзда метрополітену. Згідно з цим документом під час розгону поїзда до швидкості 33 км/год повинно забезпечуватись середнє прискорення не менше ніж 1,2 м/с<sup>2</sup>, а також у разі гальмування поїзда за швидкості 90 км/год – середнє сповільнення не менше ніж

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

1,15 м/с<sup>2</sup> за умов його номінального завантаження. Ураховуючи, що на дослідному поїзді метрополітену наявне комбіноване гальмування (суміщення електричного та пневматичного), на перший план виходить забезпечення нормованого прискорення. Таким чином, тягові розрахунки виконано для перевірки умови забезпечення розгону поїзда.

Параметри тягових асинхронних двигунів (ТАД), що встановлені на модернізованому поїзді метрополітену, такі:  $P_n = 150$  кВт;  $U_n = 610$  В;  $I_n = 185$  А;  $n_n = 1\,900$  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);  $(1+\gamma) = 1,06$ ;  $G_{зч} = 1,44$  кН;  $a = 1,2$  м/с<sup>2</sup>.

Результати тягових розрахунків, виконаних за формулами (4) – (9), представлено в табл. 1.

Таким чином, за результатами тягових розрахунків для заданих умов встановлено, що маса системи накопичення для обраного типу поїзда не повинна перевищувати 7,86 т.

*Третій етап.* Типові режими ведення поїзда метрополітену із системами рекуперації отримано експериментальним шляхом під час його руху згідно з «непіковим» та «піковим» графіками на заданих ділянках колії. При цьому кількість проїздів для кожного перегону та графіка руху становила не менше ніж 20 разів

( $n \geq 20$ ). Отримані дані було піддано методам статистичної обробки. Результати обробки даних, отриманих під час експлуатації поїзда на перегоні Хрещатик – Театральна, наведено на рис. 3.

Таблиця 1

## Результати тягових розрахунків

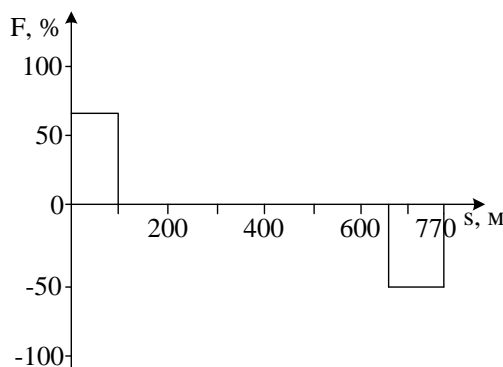
Table 1

Results of traction calculations	
Параметр	Значення
$F_{\max}$ за формулою (4), кН	$\leq 436$
$F_{\max}$ за формулою (5), кН	$\leq 317$
$F_{\min}$ , кН	$\geq 307$
$W$ , кН	2,9
$a_n$ , м/с <sup>2</sup>	1,24
$\Delta m$ , т	7,86

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

Завантаженість поїзда протягом доби в робочі та вихідні за його «пікового» й «непікового» графіків руху залежно від перегону зображено на рис. 4–6.

а – а



б – б

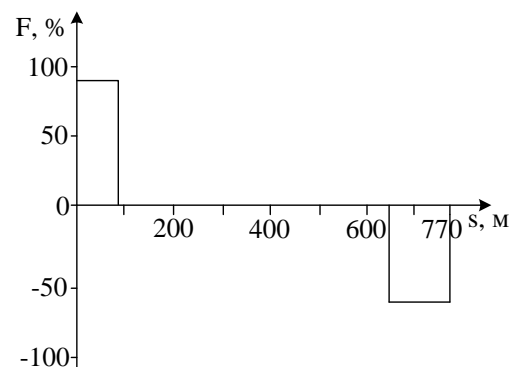


Рис. 3. Результати обробки даних під час визначення типових керуючих впливів на перегоні Хрещатик – Театральна за «непікового» (а) та «пікового» (б) графіків руху

Fig. 3. The results of data processing when determining the typical control actions on the Khreshchatyk – Teatralna run on «off-peak» (a) and «peak» (b) schedules

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

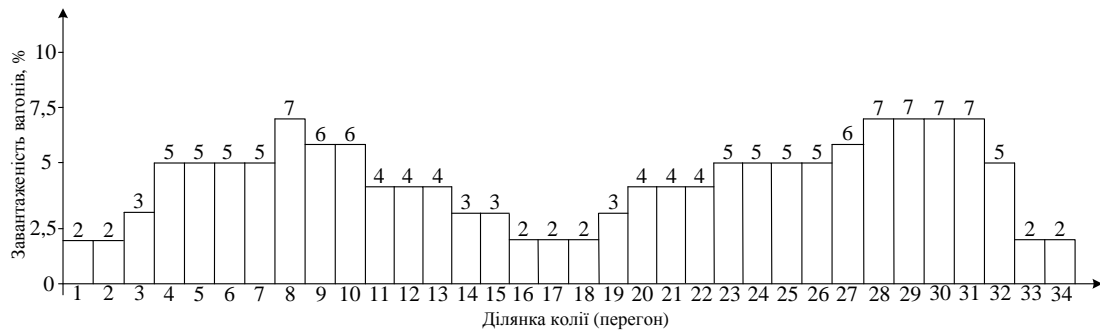
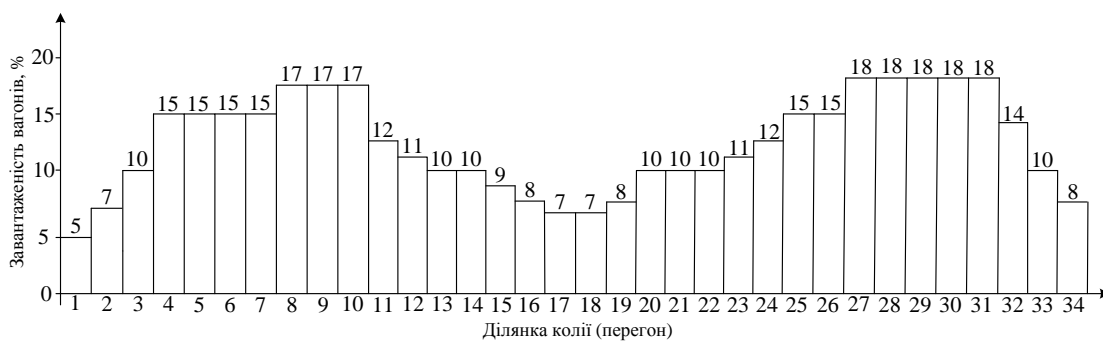
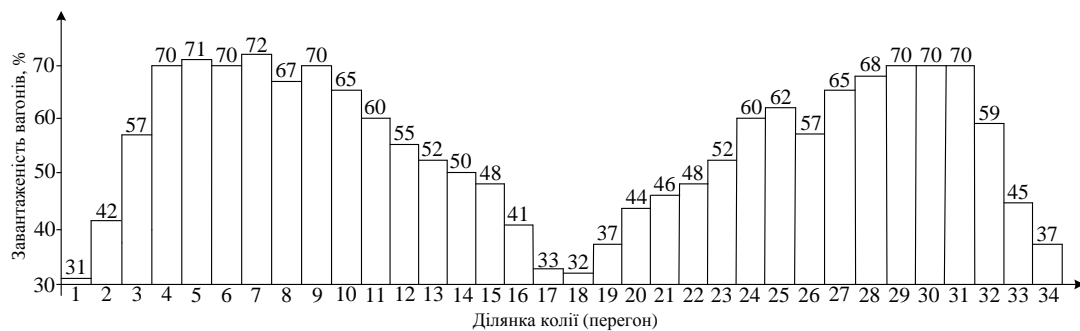
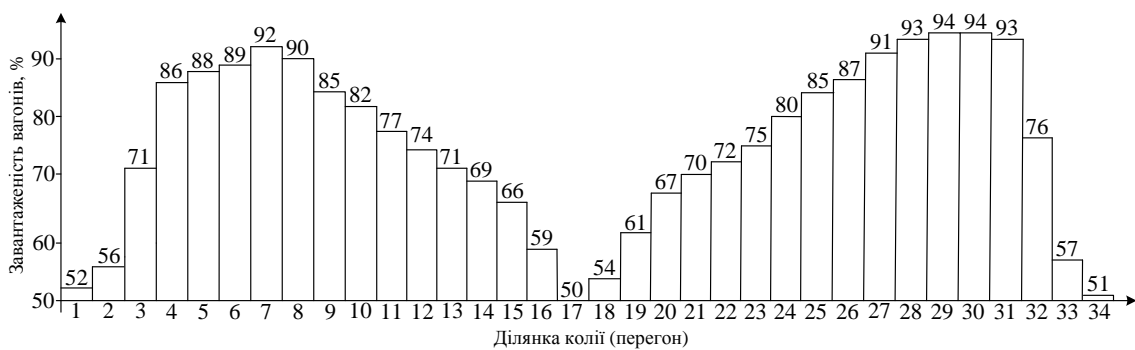
*a – a**б – b**в – c**г – d*

Рис. 4. Завантаженість поїзда протягом доби в робочий день під час його експлуатації за «непіковим» графіком:

*a* – 5<sup>30</sup>–7<sup>00</sup>; 21<sup>00</sup>–23<sup>30</sup>; *b* – 7<sup>00</sup>–8<sup>00</sup>; 20<sup>00</sup>–21<sup>00</sup>; *c* – 10<sup>00</sup>–18<sup>00</sup>; *d* – 9<sup>00</sup>–10<sup>00</sup>; 19<sup>00</sup>–20<sup>00</sup>

Fig. 4. Train loading during the day on a weekday when it is operated according to «off-peak» schedule:  
*a* – 5.30–7.00; 21.00–23.30; *b* – 7.00–8.00; 20.00–21.00; *c* – 10.00–18.00; *d* – 9.00–10.00; 19.00–20.00

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

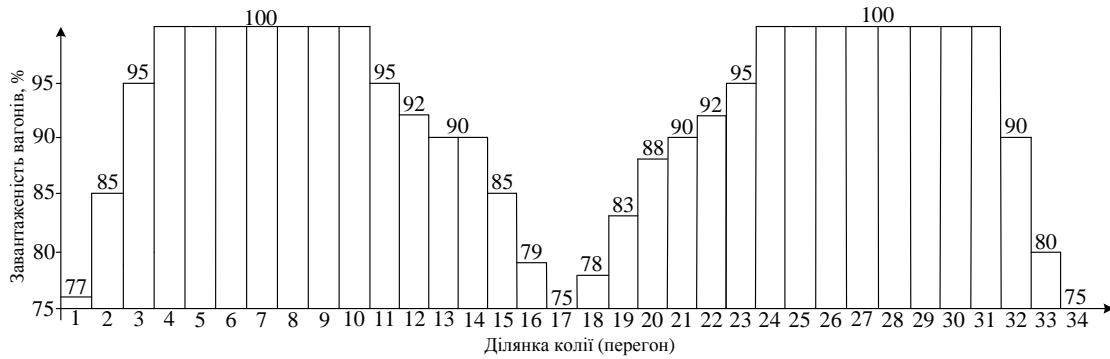


Рис. 5. Завантаженість поїзда протягом доби в робочий день під час його експлуатації за «піковим» графіком (8<sup>00</sup>–9<sup>00</sup>; 17<sup>00</sup>–18<sup>00</sup>)

Fig. 5. Train loading during the day on a weekday when it is operated according to «peak» schedule (8.00–9.00; 17.00–18.00)

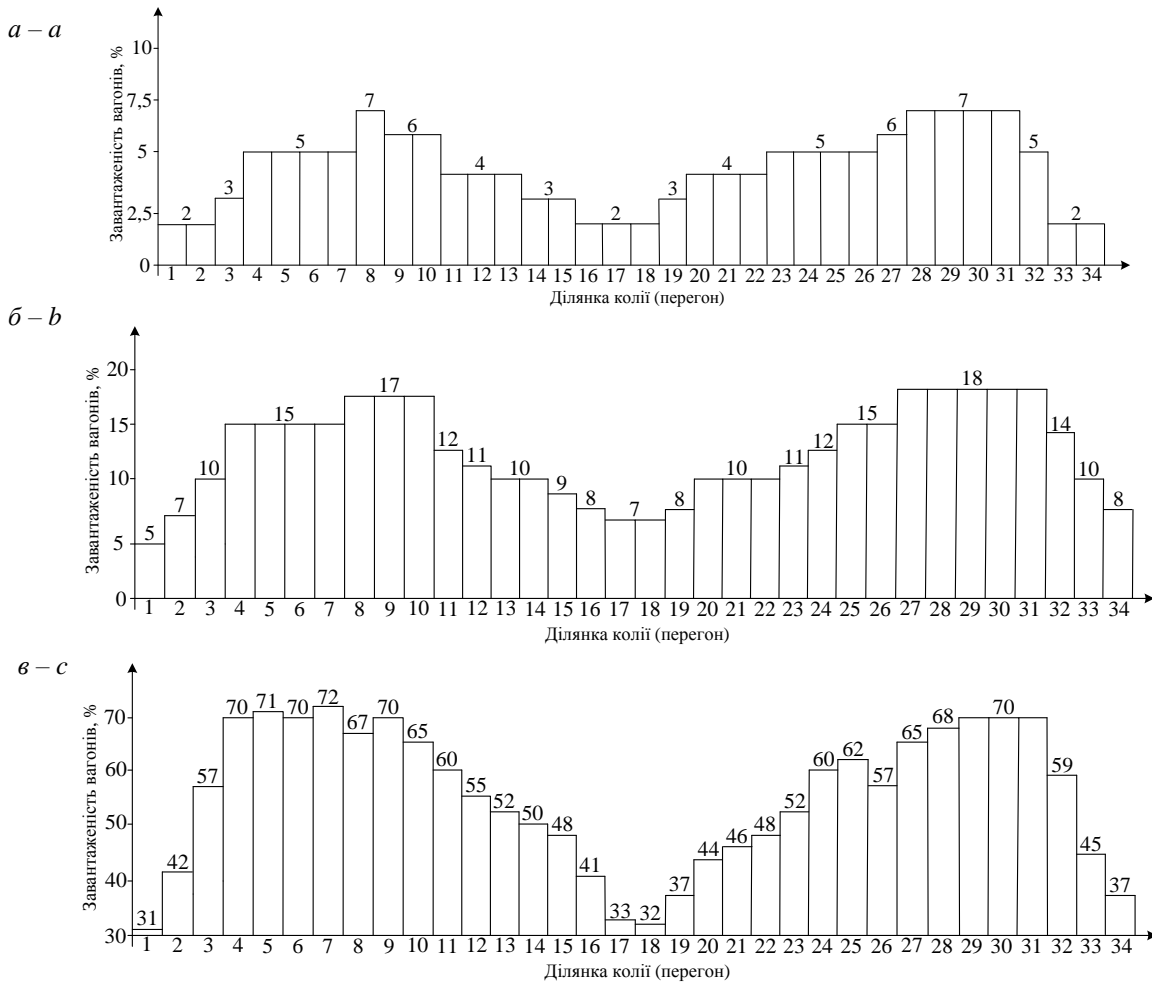


Рис. 6. Завантаженість поїзда протягом доби у вихідний день під час його експлуатації за «непіковим» графіком: a – 5<sup>30</sup>–8<sup>00</sup>; 22<sup>00</sup>–23<sup>30</sup>; б – 8<sup>00</sup>–9<sup>00</sup>; 21<sup>00</sup>–22<sup>00</sup>; в – 9<sup>00</sup>–21<sup>00</sup>

Fig. 6. Train loading during the day on a weekend when it is operated according to «peak» schedule a – 5.30–8.00; 22.00–23.30; b – 8.00–9.00; 21.00–22.00; c – 9.00–21.00



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

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

Дослідження (моніторинг) завантаженості поїзда виконали фахівці КП «Київський метрополітен» під час штатних умов його експлуатації в період з 24 по 30 листопада 2019 року на Святошинсько-Броварській лінії.

Узято, що протягом доби поїзд експлуатують таким чином:

– у робочі дні (5 днів на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіка руху (2 кола із 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» графіка (рис. 5);

– у вихідні (2 дні на тиждень) сім повних кіл з дотриманням «непікового» графіка (1 коло з мінімальним завантаженням (рис. 6, а); 1 коло – завантаження (рис. 6, б); 5 кіл – завантаження (рис. 6, в)).

Протягом року поїзд експлуатують 315 днів, із яких 225 робочих і 90 вихідних.

*Четвертий етап* передбачає моделювання руху поїзда метрополітену. Із використанням розробленого й атестованого програмного забезпечення Motion Simulation (далі – ПЗ «Motion Simulation») виконано моделювання динамічних та енергетичних процесів під час заданих штатних умов експлуатації поїзда метрополітену. Вхідні дані, показники динамічних та енергетичних процесів, а також результуючі вихідні показники, визначені під час моделювання, формули розрахунків цих показників більш детально розглянуто й описано в роботі [11]. Тому зупинитись на цьому питанні немає необхідності. Слід лише зазначити, що вхідні дані містять: енергетичну характеристику (залежність ККД тягового двигуна від швидкості руху), кількість заданих режимів ведення поїзда на перегоні, параметри профілю колії, статичні та динамічні параметри для кожного режиму ведення. Результуючим є визначення таких показників: кількість витраченої електроенергії на тягу ( $A_{\text{тяги}}$ ), кількість електроенергії, яку генерує поїзд під час рекуперативного гальмування ( $A_{\text{рек}}$ ), максимальна потужність у режимі рекуперативного гальмування ( $P_{\text{max}}$ ).

Графіки залежностей швидкості від пройденої відстані та швидкості від часу, отримані за результатами математичного моделювання під час «пікового» графіка руху на ділянці Політехнічний інститут – Шулявська, зображено на рис. 7 і 8 відповідно.

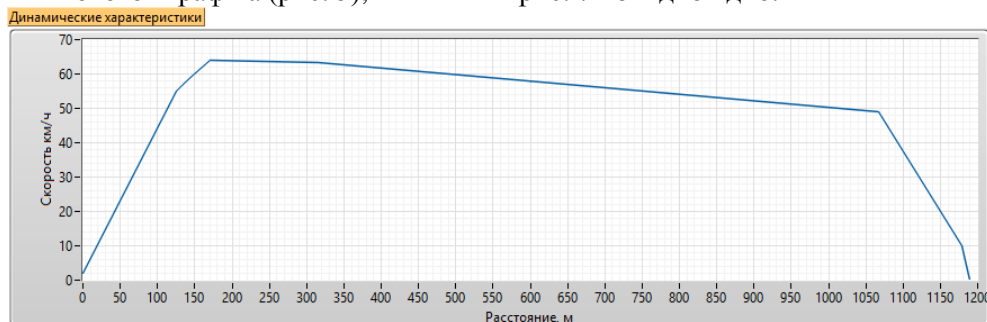


Рис. 7. Графік швидкості залежно від пройденої відстані

Fig. 7. Speed chart depending on the distance traveled

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

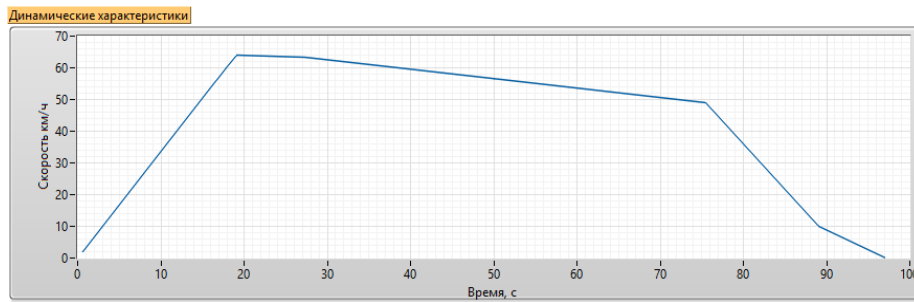


Рис. 8. Графік швидкості залежно від часу

Fig. 8 Speed chart depending on time

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

На *n'ятому етапі* виконано обробку даних математичного моделювання з використанням ПЗ «Motion Simulation». Результати обробки даних представлено в табл. 2–3.

Таблиця 2

## Результати обробки даних під час руху поїзда в робочий день

Table 2

## Data processing results during the train operation on a weekday

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
Лісова – Чернігівська	8,05/8,27/8,79/9,07/13,44	2,84/3,11/4,76/5,05/8,96	2,14/2,54/1,8/2,47/3,88
Чернігівська – Дарниця	8,78/9,02/9,78/10,8/15,63	2,12/2,35/2,63/3,37/6,75	1,12/1,24/2,09/2,12/2,43
Дарниця – Лівобережна	7,92/8,03/10,85/12,47/14,03	2,41/2,84/3,03/2,36/6,42	1,15/1,42/1,54/1,66/2,44
Лівобережна – Гідропарк	7,41/8,3/10,54/12,53/16,47	3,1/3,5/4,18/5,06/9,74	1,66/1,73/2,58/2,46/2,72
Гідропарк – Дніпро	13,55/15,58/19,77/22,31/23,74	2,2/2,41/4,29/4,59/8,34	1,21/1,36/2,22/2,1/2,49
Дніпро – Арсенальна	3,73/3,54/3,43/4,06/2,83	8,13/7,98/8,87/9,14/8,36	1,32/1,25/2,22/2,49/2,1
Арсенальна – Хрещатик	7,78/8,75/12,03/12,4/15,45	3,11/3,34/4,63/4,69/5,9	0,99/1,17/1,94/1,56/2,31
Хрещатик – Театральна	5,97/6,05/7,78/7,59/8,02	1,96/2,02/4,07/3,76/4,25	0,92/1,01/1,33/1,28/1,74
Театральна – Університет	5,91/6,13/7,49/8,67/12,43	2,25/3,02/3,41/3,63/5,25	0,87/1,18/1,18/2,03/2,73
Університет – Вокзальна	6,22/6,15/8,04/9,15/12,07	1,82/1,8/2,78/3,41/4,85	0,51/0,65/1,01/1,74/3,06
Вокзальна – Політехнічний інститут	10,52/10,74/13,94/16,99/17,51	2,85/2,91/3,74/4,68/4,86	1,13/1,2/1,8/2,31/2,19

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Продовження табл. 2  
Continuation of Table 2

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
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
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 3

## Результати обробки даних під час руху поїзда у вихідний день

Table 3

## Data processing results during train operation on a weekend

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

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

Продовження таблиці 3

Continuation of Table 3

Досліджувана ділянка	«Непиковий» графік руху за умов мінімального завантаження поїзда (рис. 6, а) / завантаження поїзда (рис. 6, б) / завантаження поїзда (рис. 6, в)		
	$A_{тяги}$ , кВт·год	$A_{рек}$ , кВт·год	$P_{max}$ , МВт
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

Із результатів обробки даних математичного моделювання (табл. 2–3) видно, що значення максимальної потужності та кількості електроенергії під час рекуперативного гальмування складають 3,88 МВт та 45,09 кВт·год відповідно. Отже, встановлено перші граничні значення параметрів бортового ЄНЕ за результатами аналізу отриманих даних:  $P_{ЄНЕ} \in [0 \dots 3,88]$ ,  $A_{ЄНЕ} \in [0 \dots 45,09]$ . Інші граничні значення потужності та енергоємності визначають з урахуванням обмежень за масою, вони залежать від обраних типів ЄНЕ.

На шостому етапі обирають параметри бортових ЄНЕ (потужність та енергоємність). У нашому випадку область граничних значень потужності та енергоємності бортових ЄНЕ визначено за умов застосування систем накопичення, зібраних на базі конденсаторних модулів таких відомих виробників як «ЕКОНД» (Росія), «Nesscap» (Корея), «Maxwell» (США), «Epcos» (Німеччина). Загальний вигляд обраних конденсаторних модулів зображено на рис. 9, їх технічні характеристики представлено в табл. 4.

а – а



б – б



в – в



г – д



д – е



е – ф



Рис. 9. Загальний вигляд конденсаторних модулів 10EK303 (а), 30EK404 (б), ESHSR-3000C0-002R7A5 (в), BMOD0063P125 B08 (г), BMOD0165P048 B01 (д), B49300 L1276 Q (е)

Fig. 9. General view of condenser modules 10EK303 (a), 30EK404 (b), ESHSR-3000C0-002R7A5 (c), BMOD0063P125 B08 (d), BMOD0165P048 B01 (e), B49300 L1276 Q (f)

## Технічні характеристики обраних конденсаторних модулів

## Technical characteristics of the chosen condenser modules

Назва показника	Тип конденсаторного модуля					
	10ЕК303	30ЕК404	ESHSR–3000C0–002R7A5	BMOD0063 P125 B08	BMOD0165 P048 BXX	B49300 L1276 Q
Робоча напруга, В	15–7,5	45–22,5	2,7–1,08	136–68	51–25,5	2,7–1,35
Ємність, Ф	4 500	400	3 000	63	200	2 700
Внутрішній опір, мОм	20	12	0,3	18	6,3	0,6
Маса, кг	34	38	0,53	61	13,5	0,73
Загальна (максимальна) кількість енергії, яку здатний запасати накопичувач, кДж	506	378	12,2	703	260	8,8
Енергія, що запасється в діапазоні робочої напруги, кДж	380	303	10,4	583	215	7,2
Габаритні розміри, мм	512x181x251	560x219x245	Ø60x144	619x33x265	418x194x179	167x61x61
Максимальна потужність, кВт	28	42	3,3	220	92	2,2
Робоча температура, °С	–50...+70	–50...+60	–40...+65	–40...+65	–40...+65	–30...+70

Системи накопичення необхідного значення робочої напруги, потужності та енергоємності 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 й систем керування та інших додаткових матеріалів. Для систем накопичення з обраних конденсаторних модулів побудовано графіки залежностей маси від потужності та маси від енергоємності, які зображено на рис. 10.

У результаті аналізу графіків (рис. 10) визначено граничні значення та області можливих

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

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

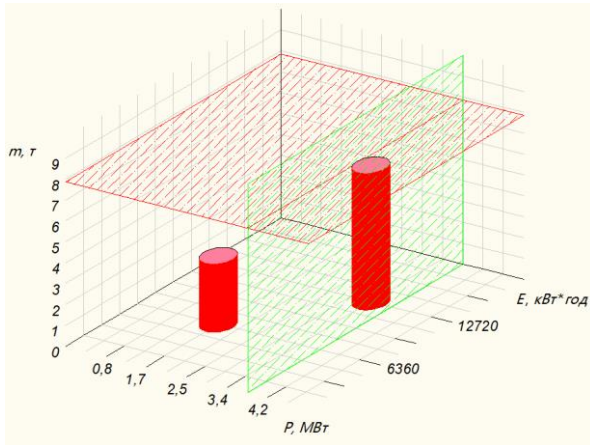
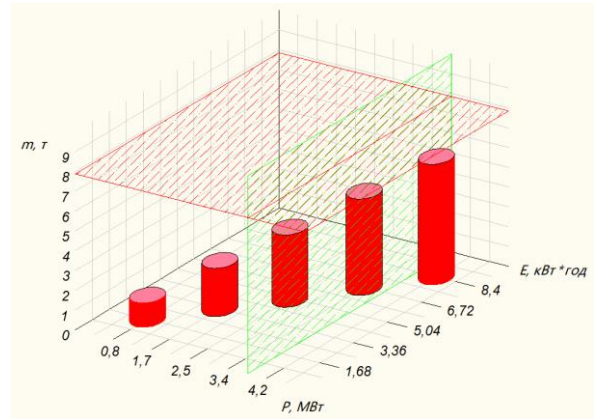
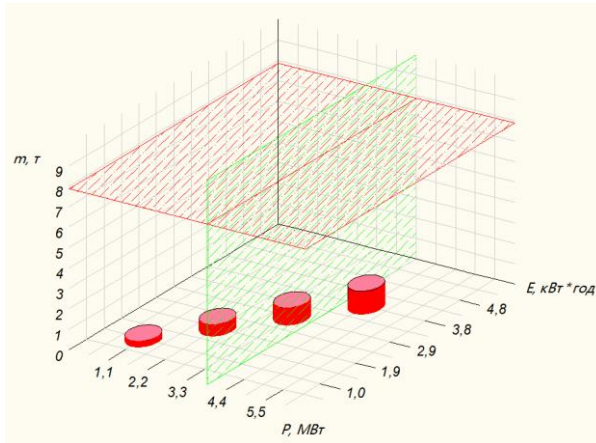
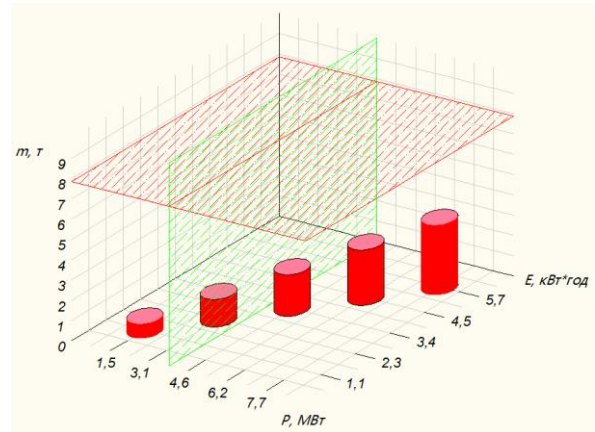
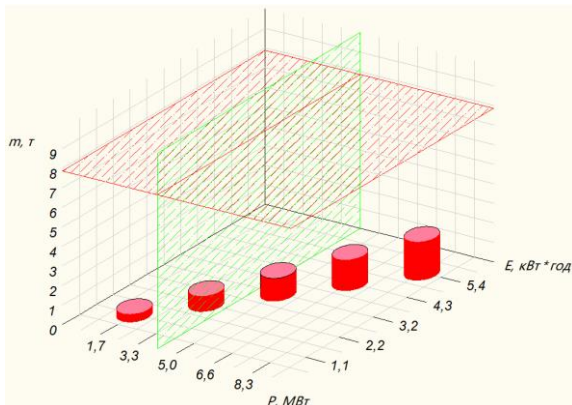
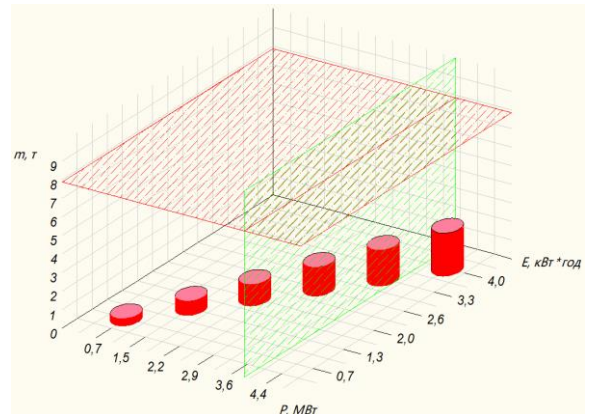
*a – a**б – б**в – в**г – г**д – д**е – е*

Рис. 10. Графіки залежності маси від потужності та енергоємності систем накопичення, зібраних з конденсаторних модулів типу:  
*a* – 10EK303; *б* – 30EK404; *в* – ESHSR–3000C0–002R7A5; *г* – BMOD0063P125 B08;  
*д* – BMOD0165 P048 BXX; *е* – B49300L1276Q

Fig. 10. Graphs of mass on power and energy consumption of storage systems collected from condenser modules type:  
*a* – 10EK303; *b* – 30EK404; *c* – ESHSR–3000C0–002R7A5;  
*d* – BMOD0063P125 B08; *e* – BMOD0165 P048 BXX; *f* – B49300L1276Q

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

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

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

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

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

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

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

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

Виходячи з отриманих граничних значень параметрів бортових СНЕ, для подальших розрахунків залежно від типу конденсаторних модулів, обрано бортові СНЕ з рівнем потужності й робочої енергоємності, які наведено в табл. 5.

Таблиця 5

## Обрані параметри бортових СНЕ

Table 5

## Chosen parameters of the on-boards CESS

Тип конденсаторного модуля	Потужність, МВт	Енергоємність, кВт·год
10ЕК303	1,7; 3,4	6,4; 12,7
30ЕК404	0,8; 1,7; 2,5; 3,4	1,7; 3,4; 5,0; 6,7
ESHSR–3000C0–002R7A5	1,1; 2,2; 3,3	1,0; 1,9; 2,9
BMOD0063 P125 B08	1,5; 3,1	1,1; 2,2
BMOD0165 P048 BXX	1,7; 3,3	1,1; 2,2
B49300L1276Q	0,7; 1,5; 2,2; 2,9; 3,6	0,7; 1,3; 2,0; 2,6; 3,3

У цьому випадку загальна кількість обраних систем накопичення з різним рівнем потужності й енергоємності бортових СНЕ, які задовольняють умовам (визначеними обмеженнями), складає 18.

*Сьомий етап.* Оцінку вартості систем накопичення здійснюють за результатами техніко-економічного аналізу вартості обраних бортових СНЕ, реверсивних перетворювачів та іншого комплектуючого обладнання від фірм-виробників цієї продукції.

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

*Восьмий етап* полягає в дослідженні кількості заощадженої електроенергії від упровадження обраних систем накопичення. Для кожного типу обраної системи накопичення виконують окремі дослідження. Спочатку для кожної типової умови експлуатації та обраної системи накопичення виконують перевірку на обмеження за потужністю, за результатами якої, у разі необхідності, відбувається перерахунок кількості рекуперованої електроенергії в накопичувач. Далі виконують оцінку кількості заощадженої електроенергії з урахуванням обмежень за енергоємністю з допомогою підпрограми «Рекуперація енергії». Алгоритм роботи цієї підпрограми детально описано в роботі [10].

Під час оцінки кількості заощадженої електроенергії взято такі 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 тягового двигуна – 0,94 ( $\eta_{\text{ТД}} = 0,94$ ), ККД редуктора – 0,98 ( $\eta_{\text{РЕД}} = 0,98$ ).

Спрощений алгоритм виконання цих досліджень показано на рис. 11.

Під час досліджень визначають такі показники: кількість заощадженої електроенергії за цикл збереження електроенергії (рекуперативне гальмування та її акумуляування під час розгону поїзда), кількість заощадженої електроенер-



## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

гії для кожної типової умови експлуатації, кількість заощадженої електроенергії за один день та рік.

Кількість заощадженої електроенергії за цикл «рекуперативне гальмування – розгін поїзда» визначають за формулою [19]:



Рис. 11. Алгоритм з оцінки кількості заощадженої електроенергії

Fig.11. Algorithm for estimating the amount of saved electricity

$$E = A_{\text{рек}} \cdot \eta_{\text{тяги}}, \quad (10)$$

де  $\eta_{\text{тяги}} = \eta_{\text{СНЕ}} \cdot \eta_{\text{рп}}^2 \cdot \eta_{\text{ТД}} \cdot \eta_{\text{РЕД}}$  – ККД енергообмінних процесів за цикл збереження та акумуляції електроенергії рекуперативної.

Кількість заощадженої електроенергії для кожної типової умови експлуатації визначають за формулою [19]:

$$E_k = E_1 + E_2 + \dots + E_N. \quad (11)$$

де  $N$  – кількість циклів для типової умови експлуатації поїзда.

Кількість заощадженої електроенергії за один день визначаються за формулою [19]:

$$E_d = m_1 \cdot E_{k1} + m_2 \cdot E_{k2} + \dots + m_n \cdot E_{kn}, \quad (12)$$

де  $m$  – кількість кіл за день для типової умови експлуатації поїзда;  $n$  – кількість типових умов експлуатації поїзда.

Кількість заощадженої електроенергії за рік визначаються за формулою [19]:

$$E_r = l_1 \cdot E_{d1} + l_2 \cdot E_{d2}. \quad (13)$$

де  $l_1, l_2$  – кількість робочих і вихідних днів на рік;  $E_{d1}, E_{d2}$  – кількість заощадженої електроенергії в робочий та вихідний дні відповідно.

Із використанням вищезазначеного алгоритму (рис. 12) та формул (10) – (13) визначено величини кількості заощадженої електроенергії від упродовження обраних систем накопичення.

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

Величину терміну окупності визначають за відношенням вартості від упродовження системи накопичення до вартості заощадженої електроенергії цією системою за рік [19]:

$$T_{\text{ок}} = \frac{Q}{T_e \cdot E_r}, \quad (14)$$

де  $Q$  – вартість системи накопичення;  $T_e$  – тариф на електроенергію ( $T_e = 2,27371$  грн/кВт·год).

Результати розрахунку терміну окупності для обраних систем накопичення зображено у вигляді діаграм на рис. 12.

*Десятий етап* (визначення системи з раціональними параметрами). Із результатів аналізу діаграм терміну окупності обраних систем накопичення видно, що для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену найбільш раціональною є система з величиною робочої енергоємності 1,7 кВт·год та максимальною потужністю 0,8 МВт, зібраної з конденсаторних модулів типу 30ЕК404 (рис. 12). Термін окупності цієї системи мінімальний і складає 3,2 роки, а маса – близько 1,2 тонни.

За умов упродовження системи накопичення з раціональними параметрами розраховано кількість заощадженої електроенергії відносно кількості спожитої електроенергії за формулою [19]:

$$\alpha = \frac{E_r}{A_{\text{тяги(рік)}}} \cdot 100, \quad (15)$$

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

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

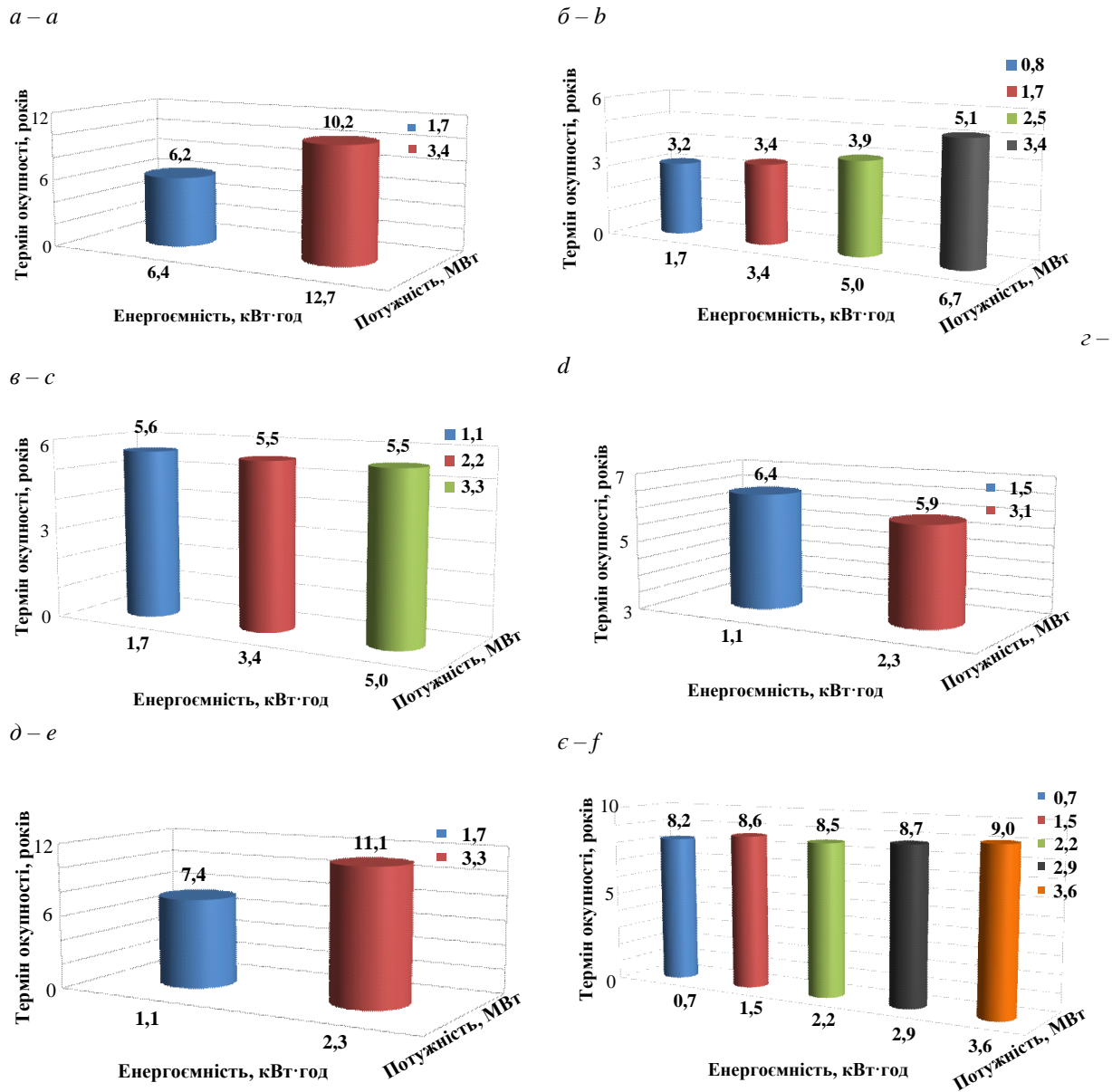


Рис. 12. Діаграми терміну окупності обраних систем накопичення, зібраних із конденсаторних модулів типу: а – 10ЕК303; б – 30ЕК404; в – ESHSR–3000C0–002R7A5; г – BMOD0063P125 B08; д – BMOD0165 P048 BXX; е – B49300L1276Q

Fig. 12. Payback diagrams of selected storage systems collected from capacitor modules of the type: а – 10ЕК303; б – 30ЕК404; в – ESHSR–3000C0–002R7A5; д – BMOD0063P125 B08; е – BMOD0165 P048 BXX; ф – B49300L1276Q

За формулою (15) визначено, що для заданих умов експлуатації впровадження системи накопичення з раціональними параметрами бортового ЄНЕ дозволить заощадити 11,4 % від обсягу спожитої електроенергії на тягу. При цьому маса системи накопичення з раціональ-

ними параметрами складає близько 0,5 та 0,8 % від маси поїзда метрополітену з максимальним завантаженням та в порожньому стані відповідно. За умов установлення цієї системи накопичення динаміка розгону поїзда погіршиться на 0,5 %.

### Наукова новизна та практична значимість

Удосконалено методологію визначення раціональних параметрів бортового ємнісного накопичувача енергії в частині заміни використання даних експериментальних досліджень теоретичними дослідженнями, суть яких полягає в моделюванні руху поїзда метрополітену з системами рекуперації за допомогою програмного забезпечення, що дозволить зменшити фінансові витрати, час на виконання досліджень та підвищить їх точність. Отримали подальший розвиток дослідження з визначення кількісних показників електроенергії рекуперації для аналізу резервів енергозбереження в метрополітені. Також отримали подальший розвиток теорії створення енергоощадного рухомого складу метрополітену із системами рекуперації, яка заснована на впровадженні як додаткового джерела живлення бортового ємнісного накопичувача, що дозволить ефективно використовувати енергію рекуперативного гальмування поїзда та розширити його експлуатаційні можливості.

### Висновки

Із використанням комплексного підходу оцінки параметрів, в основу якого покладено методи теоретичних досліджень, визначено ра-

ціональні параметри бортового ЄНЕ (максимальну потужність та робочу енергоємність) для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену із системами рекуперації.

У результаті виконаних досліджень встановлено, що для заданих режимів ведення поїзда раціональним є застосування системи накопичення з бортовим ЄНЕ, зібраного з конденсаторних модулів типу 30ЕК404, робоча енергоємність якого складає 1,7 кВт·год, а максимальна потужність – 0,8 МВт. Визначено, що термін окупності цієї системи складає 3,2 роки, а маса – 1,2 тонни.

Упровадження системи накопичення з раціональними параметрами для заданих умов експлуатації дозволить заощадити 11,4 % від обсягу спожитої електроенергії на тягу, а маса системи складає від маси поїзда метрополітену з максимальним завантаженням та в порожньому стані близько 0,5 та 0,8 % відповідно.

Подальші дослідження необхідно зосередити на розвитку теорії з визначення величин раціональної потужності та енергоємності бортових накопичувачів енергії, що дозволить їх оптимальні енергетичні параметри розраховувати за результатами визначення раціональних режимів ведення поїздів метрополітену із системами рекуперації на заданих ділянках.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Байрыева Л. С., Прокопович А. В. *Теория электрической тяги. Методическое пособие*. Москва : Изд-во МЭИ, 2004. 40 с.
2. Васильев В. А. *Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока* : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Петербургский гос. ун-т. путей сообщения. Санкт-Петербург, 2012. 16 с.
3. Костин Н. А., Никитенко А. В. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока. *Залізн. трансп. України*. 2014. № 3. С. 15–23.
4. 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*. 2017. № 5 (71). С. 48–60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624>
5. Мятаж, А. В., Ярославцев М. В. Определение энергоемкости бортового буферного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта. *Транспорт Российской Федерации*. 2013. № 4 (47). С. 62–65.
6. Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н., Озеров М. И. *Теория электрической тяги* / под ред. И. П. Исаева. Москва : Транспорт, 1995. 294 с.
7. 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.

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

8. Рябов Е. С. Определение параметров накопителя энергии для электроподвижного состава с асинхронным тяговым приводом в режиме ограничения тока тяговой сети. *Вісник НТУ «ХПИ». Серія : Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2015. № 6 (1115). С. 132–137.
9. *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.
10. Сулим А. А., Ломонос А. И. Расчет энергии рекуперации при установке накопителя на электропоезде метрополитена. *Збірник наукових праць ДЕГУТ : Серія «Транспортні системи і технології»*. 2013. Вип. 23. С. 22–29.
11. Сулим А. О., Сіора О. С., Хозя П. О., Мельник О. О. Програмне забезпечення для моделювання руху поїзда метрополітену. *Збірник наукових праць ДУИТ : Серія «Транспортні системи і технології»*. 2019. № 34. С. 182–198. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-2-2>
12. Шевлюгин М. В., Желтов К. С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. *Наука и техника транспорта*. 2008. № 1. С. 15–20.
13. Щуров Н. И., Щеглов К. В., Штанг А. А. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги. *Сборник научных трудов НГТУ*. 2008. № 1 (51). С. 99–104.
14. 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. Vol. 2. Iss. 1 (92). P. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>
15. Ghaviha N., Campillo J., Bohlin M., Dahlquist E. Review of application of energy storage devices in railway transportation. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 105. P. 4561–4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980>
16. Iannuzzi D., Tricoli P. Metro trains equipped onboard with supercapacitors : a control technique for energy saving. *SPEEDAM 2010*. P. 750–756. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5542102>
17. Khodaparastan M., Mohamed A. A., Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*. 2018. Vol. 20. Iss. 8. P. 831–2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809>
18. Mensah-Darkwa K., Zequine C., Kahol P., Gupta R. Supercapacitor Energy Storage Device Using Biowastes : A Sustainable Approach to Green Energy. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Iss. 2. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020414>
19. 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. Vol. 6, № 3 (102). P. 28–38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304>
20. Sulym A., Fomin O., Khozia P., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of onboard capacitive energy storage of the rolling stock. *Науковий Вісник НГУ*. 2018. № 5. P. 79–87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8>
21. Wiczorek M., Lewandowski M. Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. *TTS Technika Transportu szynowego*. 2018. Vol. 25, № 10. P. 39–43.
22. Xia H., Chen H., Yang Z., Lin F., Wang B. Optimal energy management location and size for stationary energy storage system in a metro line based on genetic algorithm. *Energies*. 2015. Vol. 8. Iss. 10. P. 11618–11640. DOI: <https://doi.org/10.3390/en81011618>

А. А. СУЛИМ<sup>1\*</sup>, П. А. ХОЗЯ<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения» (ГП «УкрНИИВ»), ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (05366) 6 03 54, эл. почта [sulim1.ua@gmail.com](mailto:sulim1.ua@gmail.com), ORCID 0000-0001-8144-8971

<sup>2</sup>Научно-исследовательская лаборатория экспериментальных исследований железнодорожной техники, ГП «УкрНИИВ», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (05366) 6 20 43, эл. почта [pavel.ua@gmail.com](mailto:pavel.ua@gmail.com), ORCID 0000-0001-8948-6032

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЕМКОСТНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОЕЗДА МЕТРОПОЛИТЕНА

**Цель.** В качестве основной цели авторы ставят определение рациональной мощности и энергоёмкости бортового емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) с использованием комплексного подхода оценки параметров, в основу которого положены методы теоретических исследований. **Методика.** Выполнен сравнительный анализ существующих методологий и подходов к определению параметров бортовых емкостных накопителей энергии для поезда метрополитена с системами рекуперации, сформулированы преимущества и недостатки каждого из них. Установлено, что среди существующих методологий наиболее целесообразно использовать комплексный подход, суть которого состоит в определении рациональной мощности и энергоёмкости одновременно по двум параметрам системы накопления – массе и сроке окупаемости. Предложено процедуру для определения рациональных параметров бортового емкостного накопителя энергии с использованием следующих методов исследований: теоретических основ электрической тяги, математического моделирования динамики движения и энергетических процессов, математической статистики, технико-экономического и сравнительного анализов. **Результаты.** Проведенный комплекс теоретических исследований позволяет подтвердить экономическую целесообразность внедрения бортовых емкостных накопителей энергии на поезде метрополитена. Определена система накопления с рациональными параметрами ЕНЭ для заданных условий эксплуатации в коммунальном предприятии «Киевский метрополитен» и для избранного опытного поезда метрополитена. Выполнена оценка количества сэкономленной электроэнергии за счет внедрения данной системы. **Научная новизна.** Усовершенствована методология определения рациональных параметров бортового емкостного накопителя энергии в части замены использования данных экспериментальных исследований теоретическими исследованиями, суть которых заключается в моделировании движения поезда метрополитена с системами рекуперации с помощью программного обеспечения, что позволит уменьшить финансовые затраты, время на выполнение исследований и повысить их точность. Получили дальнейшее развитие исследования по определению количественных показателей электроэнергии рекуперации для анализа резервов энергосбережения в метрополитене. **Практическая значимость.** Результаты теоретических исследований могут стать основой для создания натуральных образцов поездов метрополитена с бортовыми емкостными накопителями энергии. Проведенные исследования позволят разработать рекомендации по проектированию инновационных энергосберегающих поездов метрополитена с улучшенными технико-экономическими характеристиками, которые способны повысить эффективность функционирования перевозочного процесса в метрополитене.

*Ключевые слова:* бортовой емкостной накопитель энергии (ЕНЭ); конденсаторный модуль; поезд метрополитена; система накопления; система рекуперации

А. О. SULYM<sup>1\*</sup>, Р. О. KHOZIA<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute» (SE «UkrNIIV»), I. Prikhodka St., 33, 39621, Kremenchuk, Ukraine, tel. +38 (05366) 6 03 54, e-mail sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971

<sup>2</sup>Research Laboratory of Experimental Research of Railway Technique (SE «UkrNIIV»), I. Prikhodka St., 33, 39621, Kremenchuk, Ukraine, tel. +38 (05366) 6 20 43, e-mail pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032

## IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR RATIONAL PARAMETERS DETERMINATION OF THE CAPACITIVE ENERGY STORAGE FOR THE METRO TRAIN

**Purpose.** The purpose of the work is to determine the rational capacity and energy consumption of the onboard capacitive energy storages using a complex approach for estimating the parameters, which is based on the methods of theoretical research. **Methodology.** The article performs a comparative analysis of existing methodologies and approaches for determination of the onboard capacitive storages parameters for subway trains with recovery systems, formulates the advantages and disadvantages of each of them. It is determined that among the existing methodologies it is most reasonable to use a complex approach, the aim of which is to determine the rational capacity and energy consumption according to two parameters of the energy storage system – weight and payback period. A pro-

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

cedure for determining the rational parameters of the onboard capacitive energy storage using theoretical research methods is proposed: theoretical basis of electric traction, mathematical modeling of dynamic motion and energy processes, mathematical statistics, technical-economic and comparative analysis. **Findings.** According to the results of the complex theoretical researches, the economic expediency of implementation of onboard capacitive energy storages on the subway train is confirmed. The energy storage system with rational parameters of the onboard capacitive energy storage for established operating conditions in the Municipal Enterprise «Kyiv Metro» and selected experimental train of the subway is determined. The amount of saved electricity due to the implementation of the energy storage system with rational parameters is estimated. **Originality.** The methodology for determining the rational parameters of the onboard capacitive energy storage in terms of replacing the use of experimental research data with theoretical research, the purpose of which is to model the movement of subway trains with recovery systems using software to reduce financial costs, research time and increase their accuracy. The research on determination of quantitative indicators of recovery electricity for the analysis of energy saving reserves was further developed in the subway. **Practical value.** The results of theoretical research can be the basis for the creation of full-scale samples of subway trains with onboard capacitive energy storages. The researches will create recommendations for the design of innovative energy-saving subway trains with improved technical and economic characteristics that can increase the efficiency of the transportation process in the subway.

**Keywords:** on-board capacitive energy storage; condenser module; subway train; energy storage system; recovery system

## REFERENCES

1. Bayryeva, L. S., & Prokopovich, A. V. (2004). *Teoriya elektricheskoy tyagi. Metodicheskoe posobie*. Moscow: izdatelstvo MEI. (in Russian)
2. Vasilyev, V. A. (2012). *Povyshenie energeticheskoy effektivnosti elektropoezdov postoyannogo toka*. (Extended abstract of PhD dissertation). Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russia. (in Russian)
3. Kostin, N. A., & Nikitenko, A. V. (2014). Autonomy regenerative braking-the basis for reliable energy-efficient heat recovery in electric rolling stock DC. *Railway Transport of Ukraine*, 3, 15-23. (in Russian)
4. Mukha, A. M., Kostin, N. O., Kurylenko, O. Y., & Tsyplia, H. V. (2017). Enhancing the operational efficiency of direct current drive based on use of supercondenser power storage units. *Science and Transport Progress*, 5(71), 48-60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/114624> (in Ukrainian)
5. Myatezh, A. V., & Yaroslavtsev, M. V. (2013). Opredelenie energoemkosti bortovogo buferного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта. *Transport of Russian Federation*, 4(47), 62-65. (in Russian)
6. Rozenfeld, V. Ye., Isaev, I. P., Sidorov, N. N., & Ozerov, M. I. (1995). *Teoriya elektricheskoy tyagi*. (Isaev, I. P. (Ed.)). Moscow: Transport. (in Russian)
7. Rybalko, A. Ya., & Dybrin, S. V. (2008). Vybor emkosti nakopitelya energii dlya obespecheniya snizheniya maksi-muma potrebyaemoy moshchnosti. *Mining informational and analytical bulletin*, 8, 356-361. (in Russian)
8. Ryabov, Ye. S. (2015). Opredelenie parametrov nakopitelya energii dlya elektropodvizhnogo sostava s asinkhronnym tyagovym privodom v rezhime ogranicheniya toka tyagovoy seti. *Bulletin NTU KhPI. Series: Mathematical modeling in engineering and technologies*, 6(1115), 132-137. (in Russian)
9. *Vaghony metropolitenu. Zagaljni tekhnichni vymoghy*, 29 SOU MPP 45.060-253:2008 (2010). (in Ukrainian)
10. Sulim, A. A., & Lomonos, A. I. (2013). Raschet energii rekuperatsii pri ustanovke nakopitelya na elektropoezde metropolitena. *Transport Systems and Technologies: Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies*, 23, 22-29. (in Russian)
11. Sulym, A., Siora, O., Khozia, P., & Melnyk, O. (2019). Programne zabezpechennja dlja modeljuvannja rukhu pojizda metropolitenu. *Collection of Scientific Works of the State University of Infrastructure and Technologies Series «Transport Systems and Technologies»*, 34, 182-198. DOI: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2019-34-2-2> (in Ukrainian)
12. Shevlyugin, M. V., & Zheltov, K. S. (2008). On reduction of electric power consumption in moscow underground by application of capacitive energy storage devices. *Science and Technology of Transport*, 1, 15-20. (in Russian)

## ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

13. Shchurov, N. I., Shcheglov, K. V., & Shtang, A. A. (2008). The application of devices storage energy in system in the systems of electric traction. *Transaction of Scientific Papers of the Novosibirsk State Technical University*, 1(51), 99-104. (in Russian)
14. 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(1(92)), 63-71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080> (in English)
15. Ghaviha, N., Campillo, J., Bohlin, M., & Dahlquist, E. (2017). Review of Application of Energy Storage Devices in Railway Transportation. *Energy Procedia*, 105, 4561-4568. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.980> (in English)
16. Iannuzzi, D., & Tricoli, P. (2010). Metro trains equipped onboard with supercapacitors: A control technique for energy saving. *SPEEDAM 2010*, 750-756. DOI: <https://doi.org/10.1109/SPEEDAM.2010.5542102> (in English)
17. Khodaparastan, M., Mohamed, A. A., & Brandauer, W. (2019). Recuperation of Regenerative Braking Energy in Electric Rail Transit Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(8), 2831-2847. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2886809> (in English)
18. Mensah-Darkwa, K., Zequine, C., Kahol, P., & Gupta, R. (2019). Supercapacitor Energy Storage Device Using Biowastes: A Sustainable Approach to Green Energy. *Sustainability*, 11(2), 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11020414> (in English)
19. 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*, 6(3(102)), 28-38. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.183304> (in English)
20. Sulym, A. O., Fomin, O. V., Khozia, P. O., & Mastepan, A. G. (2018). Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5, 79-87. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-5/8> (in English)
21. Wiczorek, M., & Lewandowski, M. (2018). Zasobnik energii umożliwiający przejazd tramwaju przez skrzyżowanie bez użycia sieci trakcyjnej. *TTS Technika Transportu szynowego*, 25(10), 39-43. (in Polish)
22. Xia, H., Chen, H., Yang, Z., Lin, F., & Wang, B. (2015). Optimal Energy Management, Location and Size for Stationary Energy Storage System in a Metro Line Based on Genetic Algorithm. *Energies*, 8(10), 11618-11640. DOI: <https://doi.org/10.3390/en81011618> (in English)

Надійшла до редколегії: 22.05.2020

Прийнята до друку: 23.09.2020