

SECTION 5. POWER ENGINEERING

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-172-5-13>

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ДЛЯ ПОЇЗДА МЕТРОПОЛІТЕНУ

Сулим А. О.

*кандидат технічних наук, старший дослідник,
заступник директора з наукової роботи
Державне підприємство «Український науково-дослідний
інститут вагонобудування»
м. Кременчук, Полтавська область, Україна*

Зростання кількості населення у містах мегаполісах висуває все більш жорсткі вимоги до функціонування метрополітену. Для задоволення цих вимог метрополітени збільшують кількість вагонів у поїздах й інтенсивність руху, внаслідок чого відбувається динамічне підвищення споживання електроенергії та експлуатаційних витрат. Це зумовлює необхідність створення і впровадження в експлуатацію інноваційних енергоефективних поїздів метрополітену з покращеними техніко-економічними, експлуатаційними, екологічними показниками.

Світовий досвід та результати вже проведених робіт підтверджують, що використання на рухомому складі асинхронної тяги, частотно-регульованого приводу, мікропроцесорних систем керування, світлодіодного освітлення, систем рекуперації сприяє зменшенню споживання електроенергії [1]. Відомо, що впровадження інноваційних поїздів метрополітену дозволяє заощадити до 40 % електроенергії, що витрачається на тягу [2]. При цьому існують резерви додаткових заощаджень за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування поїздів. Одним з ефективних заходів з підвищення використання електроенергії рекуперації поїздів є впровадження на їх борту ємнісних накопичувачів енергії (СНЕ) [3, 4].

За умов створення інноваційних поїздів з системами рекуперації та СНЕ актуальним постає питання вибору раціональних енергетичних параметрів останніх (потужності та енергоемності). Зазначене питання розглядалось у дослідженнях як вітчизняних, так і закордонних вчених.

В основу цих досліджень покладено використання таких методів та основних положень: методи аналізу технічних характеристик поїзда (за оцінкою кількості кінетичної енергії поїзда), 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 та інші.

Узагальнений аналіз існуючих підходів [3–6] дозволив встановити наступне:

- існують підходи, які дозволяють швидко отримати результат щодо визначення параметрів бортових ЄНЕ та не потребують значних затрат часу, однак вони не дозволяють враховувати різні фактори реальних умов експлуатації рухомого складу;

- більш точними є дослідження, які враховують реальні умови експлуатації рухомого складу та дозволяють визначати раціональні параметри бортових ЄНЕ, однак їх недоліками є складність та тривалість виконання досліджень;

- підходи, які засновані на використанні даних експериментальних досліджень, потребують значних фінансових ресурсів та часу, проте вони дозволяють більш точно враховувати реальні умови експлуатації рухомого складу.

На разі найбільший розвиток отримали підходи, в яких здійснюється вибір раціональних параметрів бортових ЄНЕ з використанням теоретичних досліджень за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм. Ці програми дозволяють достатньо точно відтворювати процеси реальної експлуатації рухомого складу та дозволяють значно зекономити фінансові ресурси та зменшити витрати часу на проведення таких досліджень. В цій роботі запропоновано розвинути теорію обґрунтування вибору раціональних параметрів бортових ЄНЕ (потужності та енергоємності) для поїзда метрополітену шляхом вирішення багатокритеріальної задачі.

Мета – розробити багатокритеріальний підхід до обґрунтування вибору раціональної потужності та енергоємності ЄНЕ для поїзда метрополітену шляхом виконання теоретичних досліджень за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми.

В ході виконання досліджень було розроблено підхід, який ґрунтується на визначенні раціональних параметрів ЄНЕ (потужності та енергоємності) за допомогою вирішення багатокритеріальної задачі методом головного критерію. В якості головного критерію обрано мінімальний термін окупності системи накопичення, на інші два критерії – маса та об'єм системи накопичення встановлено обмеження. Під

системою накопичення мається на увазі ЄНЕ, реверсивний статичний перетворювач та система керування енергообмінними процесами між ЄНЕ та тяговим електроприводом. Обмеження за масою та об'ємом накладаються з урахуванням технічних характеристик конкретної моделі поїзда.

Розроблений багатокритеріальний підхід з обґрунтування вибору раціональних параметрів бортового ЄНЕ для поїзда метрополітену складається з наступних етапів:

1) вибір ділянки експлуатації та моделі поїзда метрополітену з системами рекуперації;

2) виконання тягових розрахунків (визначення масових обмежень для системи накопичення за результатами аналізу виконаних тягових розрахунків);

3) визначення обмежень за об'ємом для системи накопичення, виходячи з наявного вільного простору на поїзді метрополітену з системами рекуперації;

4) визначення типових штатних умов ведення поїзда на заданій ділянці колії;

5) визначення раціонального режиму ведення поїзда метрополітену на заданій ділянці за допомогою розробленої комп'ютерної програми, а також моделювання динаміки руху та енергетичних процесів;

6) обробка даних комп'ютерного моделювання, за результатами якого визначаються максимальні значення потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування поїзда;

7) вибір параметрів ЄНЕ з урахуванням отриманих максимальних значень потужності та кількості електроенергії рекуперативного гальмування поїзда, а також їх обмежень за масою та об'ємом;

8) визначення вартості обраних систем накопичення з урахуванням витрат за їх життєвий цикл;

9) дослідження кількості заощадженої електроенергії від впровадження обраних систем;

10) побудова діаграм терміну окупності обраних систем накопичення;

11) визначення раціональних параметрів ЄНЕ (потужності та енергоємності) за результатами аналізу діаграм терміну окупності.

Узагальнений математичний опис цільової функції багатокритеріального підходу до обґрунтування вибору раціональних параметрів ЄНЕ можна представити у наступному вигляді:

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

де $f(x)$ – головний критерій раціональності; D – область можливих рішень, яка визначається границями відповідних значень (параметричні обмеження);

k – кількість прийнятих обмежень для пошуку раціонального рішення.

В нашому випадку головним критерієм обрано мінімальний термін окупності системи накопичення. З урахуванням обраного критерію формулювання задачі раціоналізації: знайти такі значення потужності та енергоємності 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 були встановлені такі граничні значення параметрів: $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots P_{\Delta m}]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots A_{\Delta m}]$, $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots P_{\Delta V}]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots A_{\Delta V}]$, $P_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots P_{\text{max}}]$, $A_{\text{ЄНЕ}} \in [0 \dots A_{\text{рекmax}}]$, де $P_{\Delta m}$, $A_{\Delta m}$, $P_{\Delta V}$, $A_{\Delta V}$ – максимальні значення потужності та енергоємності за масою та об'ємом відповідно, які залежать від моделі поїзда метрополітену з системами рекуперації; P_{max} , $A_{\text{рекmax}}$ – максимальні значення потужності та кількості електроенергії рекуперації для змодельованих раціональних режимів ведення поїзда.

За умов, якщо цільова функція має декілька мінімальних значень, то обирається система 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 однаковим мінімальним терміном окупності; α – кількість заощадженої електроенергії за рахунок впровадження системи накопичення.

Після того, як обґрунтовано вибір системи накопичення з раціональними параметрами ЄНЕ, оцінюється вплив цієї системи на динаміку розгону поїзда.

Висновки. Розроблено новий підхід до обґрунтування вибору потужності та енергоємності ЄНЕ з використанням багатокритеріального підходу оцінки параметрів, в основу якого покладено моделювання руху поїзда метрополітену з системами рекуперації за допомогою програмного забезпечення. Сформульовано

задачу оптимізації, визначено головний критерій та встановлено граничні значення параметрів для цільової функції.

Рекомендації. Подальші дослідження необхідно направити на визначення раціональних параметрів СНЕ для заданих умов експлуатації поїзда метрополітену з системами рекуперації з використанням розробленого підходу.

Література:

1. Сулим А.О., Третьяк Е.В., Хозя П.О., Мельник О.О., Мужичук С.О. Оцінка резервів енергозбереження під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації. *Електро-механічні і енергозберігаючі системи*. 2019. № 3(47). С. 66–77. DOI: <https://doi.org/10.30929/2072-2052.2019.3.47.66-77>

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

3. 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.

3. 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.

4. Kostin M.O., Mukha A.M., Sheikina O.H., Kurylenko O.Y. Determination of energy and electric capacity of on-board supercapacitor regenerative energy storage. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп. ім. В. Лазаряна*. 2021. № 2(92). С. 29–39. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/237500>

5. Мятаж 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.

6. Fomin O., Sulym A., Kulbovskiy I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Issue 2 (92). P. 63–71. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126080>