ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 629.432:62–593

А. О. СУЛИМ[1*], С. О. МУЖИЧУК[2], П. О. ХОЗЯ[3], О. О. МЕЛЬНИК[4], В. В. ФЕДОРОВ[5]

[1*]Науково-дослідна лабораторія електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, ел. пошта sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971
[2]Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагонобудівний завод», вул. І. Приходька, 139, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (067) 535 64 96, ел. пошта zgk_metro@kvsz.com, ORCID 0000-0002-2653-1622
[3]Науково-дослідна лабораторія електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, ел. пошта pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032
[4]Науково-дослідна лабораторія електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, ел. пошта shurik110982@gmail.com, ORCID 0000-0001-8964-4790
[5]Науково-дослідна лабораторія вантажного та спеціального рухомого складу, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 13 84, ел. пошта F.vladimir.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0963-7265

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

Мета. За результатами аналізу існуючих досліджень установлено, що на даний час проблема підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену стає особливо актуальною та потребує своєчасного вирішення. Відомо, що впровадження систем рекуперативного гальмування на рухомому складі дозволить в значній мірі вирішити цю проблему. Обґрунтовано, що одним із ключових питань при впровадженні вищезазначених систем залишаються дослідження з ефективності використання електроенергії рекуперативного гальмування. Мета роботи – оцінка кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час штатних умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації для аналізу резерву енергозбереження. **Методика.** Використовуючи результати експериментальних досліджень енергообмінних процесів під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації, а також застосовуючи статистичні методи обробки даних, визначено кількісні показники електроенергії, спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі та виділеної на гальмівних резисторах (надлишкової). **Результати.** За аналізом результатів досліджень під час заданих штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен» встановлено наступне: 1) впровадження систем рекуперації на рухомому складі дозволяє повернути в контактну мережу на рівні 17,9–23,2 % електроенергії, що споживається на тягу; 2) існують резерви підвищення енергоефективності рухомого складу з системами рекуперації на рівні 20,2–29,9 % електроенергії, що споживається на тягу. **Наукова новизна.** Вперше обґрунтовано, що найбільш вагомим фактором, який здійснює вплив на кількісні показники електроенергії рекуперації, є профіль колії. Запропоновано в якості кількісної оцінки застосовувати коефіцієнти, які показують кількість та резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії. Дістали подальшого розвитку дослідження з визначення кількісних показників електроенергії рекуперації для аналізу резервів енергозбереження. **Практична значимість.** Отримані кількісні показники надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування можуть бути використані під час створення нового або модернізації існуючого рухомого складу метрополітену у випадку розробки енергоефективного технічного рішення для утилізації, збереження та акумулювання цієї електроенергії.

Ключові слова: рекуперативне гальмування; рухомий склад метрополітену; система рекуперації; енергозбереження; енергоефективність

doi 10.15802/stp2017/112934 © А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

Вступ

Метрополітен є одним з найважливіших засобів забезпечення мобільності населення великих міст. У зв'язку з постійним підвищенням кількості транспортних засобів у містах з населенням більше ніж 1 млн чоловік тільки метрополітен здатний вирішити проблему мобільності населення. Однак, за наявності ряду позитивних якостей метрополітену, таких як забезпечення високої мобільності перевезень, екологічність, збереження архітектури міста, має місце і негативний фактор – значне споживання електроенергії. Тому, починаючи з впровадження перших метрополітенів, ведуться роботи зі зменшення витрат електроенергії метрополітену.

Від того, наскільки ефективно експлуатується метрополітен, залежать обсяги перевезень, витрати за спожиту електроенергію та собівартість транспортних послуг, що представляються населенню. В умовах збільшення пасажироперевезень та постійного підвищення тарифів на електроенергію, зниження енергоспоживання даним видом транспорту стає особливо актуальним [16].

Вирішенню низки питань з енергозбереження на міському електричному транспорті, зокрема на метрополітені, присвячені роботи багатьох вітчизняних та іноземних вчених [1–9, 12–20].

З аналізу зазначених досліджень відомо, що один з ефективних заходів зі зниження споживання електроенергії на тягу – використання систем рекуперативного гальмування на рухомому складі. За результатами деяких досліджень [1–9, 12–20] встановлено, що впровадження систем рекуперації на рухомому складі метрополітену дозволить скоротити до 40 % електроенергії, що витрачається на тягу. Проте з аналізу досліджень [1–9] встановлено, що ефективність використання електроенергії рекуперативного гальмування залежить від багатьох факторів. Серед основних можна виділити наступні: інтенсивність руху в зоні рекуперації, режим руху інших споживачів електроенергії, відстань між станціями та профіль колії. Як наслідок, використання електроенергії рекуперативного гальмування має імовірнісний характер.

До недавнього часу рухомий склад вітчизняних метрополітенів не був обладнаний системами рекуперації, як наслідок, не було можливості генерації електроенергії в контактну мережу і вона повністю розсіювалась у вигляді теплоти на гальмівних резисторах. В останні роки, з метою скорочення споживання електроенергії на тягу, метрополітенами України поступово вводиться в експлуатацію новостворений та модернізований рухомий склад. Головними відмінностями даного рухомого складу є впровадження енергозберігаючого обладнання та технологій, насамперед систем рекуперації.

При впровадженні систем рекуперації на рухомому складі метрополітену одним з ключових питань є оцінка кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час його реальних умов експлуатації. Актуальність вирішення даного питання обумовлена необхідністю визначення реальної ефективності від застосування зазначених систем на рухомому складі метрополітену.

Слід зазначити, що в низці досліджень проводилась така оцінка реальної ефективності від впровадження систем рекуперації на рухомому складі. У роботах [7, 9] виконано оцінку можливої кількості заощадженої електроенергії для реальних умов експлуатації рухомого складу з реостатним гальмуванням в КП «Дніпропетровський метрополітен»; у роботі [14] – у Московському метрополітені. Зазначені дослідження здійснювалися на рухомому складі метрополітену без можливості генерації електроенергії до контактної мережі. За результатами цих досліджень встановлено, що в режимі реостатного гальмування утилізується 15–52 % електроенергії, яка витрачається на тягу поїздів. У роботах [1, 3, 4, 12, 20] оцінка виконувалась для рухомого складу метрополітену з встановленими на ньому системами рекуперації. У зазначених дослідженнях оцінка здійснювалась для рухомого складу метрополітену без урахування реальних умов експлуатації (зміни профілю колії, завантаження вагонів, графіку руху тощо). За результатами аналізу дослідження [3] встановлено, що впровадження систем рекуперації на вагонах моделей 81.715, 81.716 в умовах їх експлуатації на одній з ліній Московського метрополітену з максимальним завантаженням вагонів дозволяє заощадити в середньому 9,4 % від

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

всієї електроенергії, яка витрачається на тягу поїздів.

Таким чином, результати досліджень [1–9, 12–20] не дають змогу оцінити ефективність від впровадження систем рекуперації на рухомому складі в повному обсязі. Зокрема, відсутні дослідження з оцінки ефективності зазначених систем під час зміни штатних умов експлуатації. Отже, вищезазначене питання залишається маловивченим і актуальним.

Мета

Оцінка кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації для аналізу резервів енергозбереження.

Методика

Дослідження енергообмінних процесів виконано на Святошинсько-Броварській лінії КП «Київський метрополітен» під час типових штатних умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації протягом доби. Під типовими штатними умовами експлуатації маються на увазі наступні режими: максимальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху, номінальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху, мінімальне завантаження (зайняті сидячі місця) з дотриманням «непікового» графіку руху. Рухомий склад представляє собою п’ятивагонний модернізований поїзд з асинхронним тяговим приводом, в якому голов-ні вагони – безмоторні, проміжні – моторні.

Дослідження проведено з використанням вимірювальної системи, що встановлена на модернізованому поїзді. Вимірювальна система розроблена спеціалістами ДП «УкрНДІВ» для дослідження енергообмінних процесів між контактною мережею та поїздом в реальних умовах його експлуатації. До складу вимірювальної системи входять: персональний комп’ютер, аналого-цифровий перетворювач, блок комутації, блок узгодження та вимірювальні датчики. Обробка даних на персональному комп’ютері здійснюється за допомогою атестованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО» [10]. Вимірювальна система передбачає отримання, відображення та збереження даних вимірювальних датчиків, які встановлені на дослідному поїзді.

Графіки напруги контактної мережі та струму у вагоні поїзда метрополітену під час здійснення рекуперативного гальмування зображені на рис. 1. Осцилограми напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху поїзда при його експлуатації з максимальним завантаженням між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії за умов дотримання «непікового» графіку руху приведені на рис. 2–3. Аналогічними чином було отримано осцилограми для інших заданих умов ведення поїзда (максимальне завантаження з дотриманням «пікового» графіка руху, номінальне завантаження з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху, мінімальне завантаження з дотриманням «непікового» графіку руху.) Також для зазначених штатних умов експлуатації були отримані осцилограми напруги на гальмівних резисторах та струму, який розсіяно у вигляді теплоти на гальмівних резисторах. Таким чином, за допомогою вимірювальної системи було зафіксовано з частотою дискретизації 2,5 кГц напругу на струмоприймачі $u(t)$, струм поїзда в режимах тяги та рекуперативного гальмування $i(t)$; напругу на гальмівних резисторах $uЗ_R(t)$, струм на гальмівних резисторах $i_R(t)$, а також швидкість руху поїзда $v(t)$.

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

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)

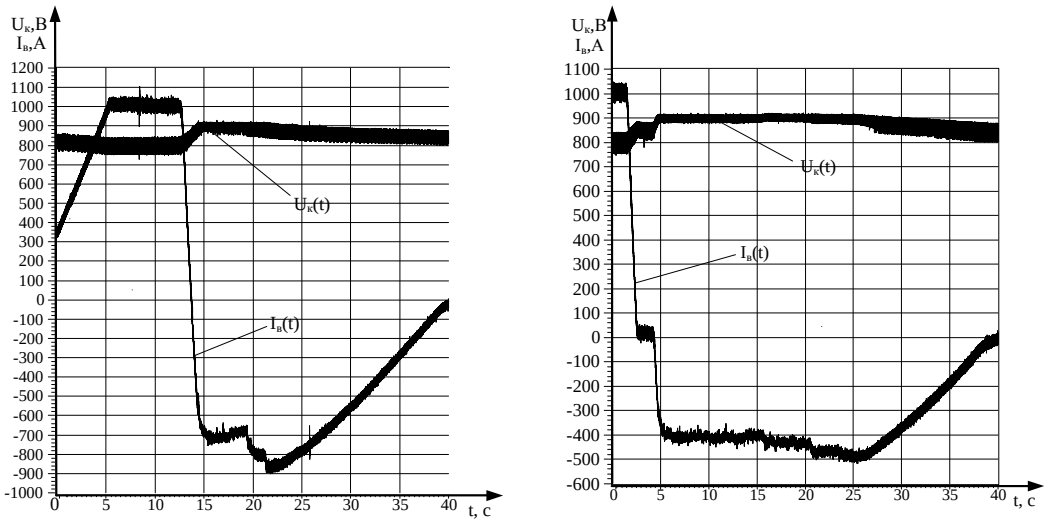


Рис. 1. Графіки напруги контактної мережі та струму вагона поїзда метрополітену під час здійснення рекуперативного гальмування

Fig. 1. Graphs of the contact network voltage and the train car current in the subway when performing regenerative braking

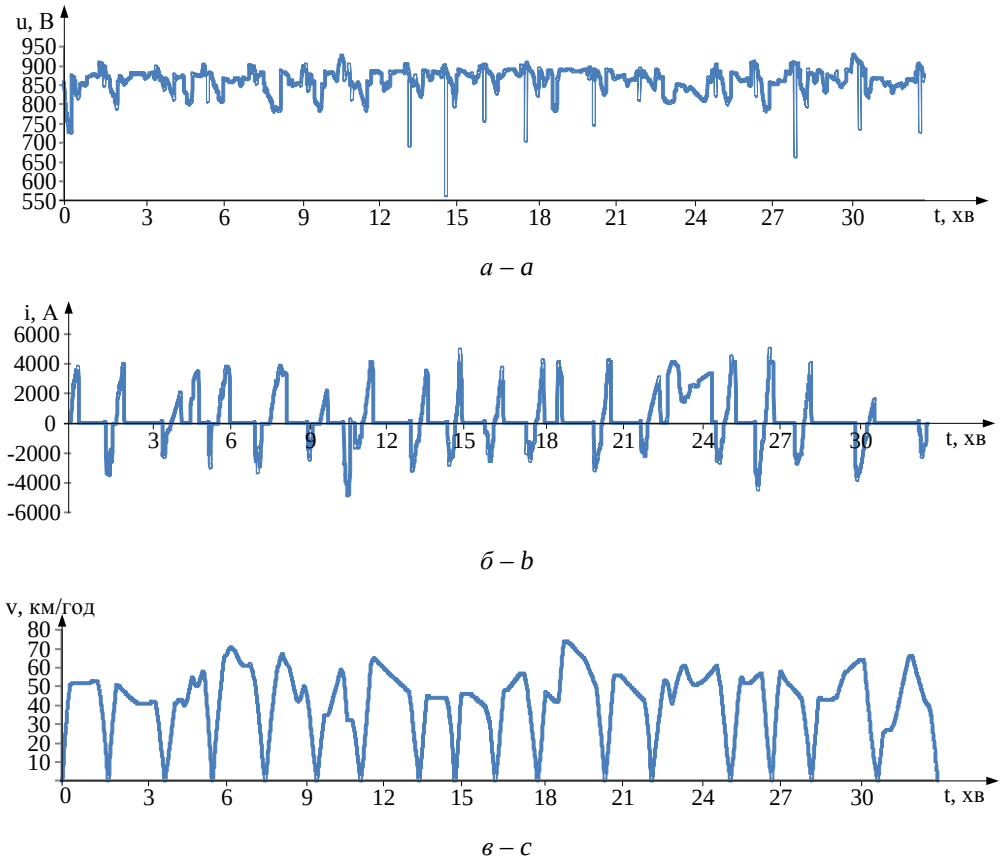


Рис. 2. Осцилограми напруги: *а* – на струмоприймачі; *б* – струму поїзда; *в* – та швидкості руху поїзда під час його експлуатації між станціями «Лісова–Академмістечко»

Fig. 2. Oscillograms of voltage: *a* – on current collectors; *b* – train current; *c* – and the speed of the train (in) when its operation between stations «Lisova–Akademmistechko»

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)

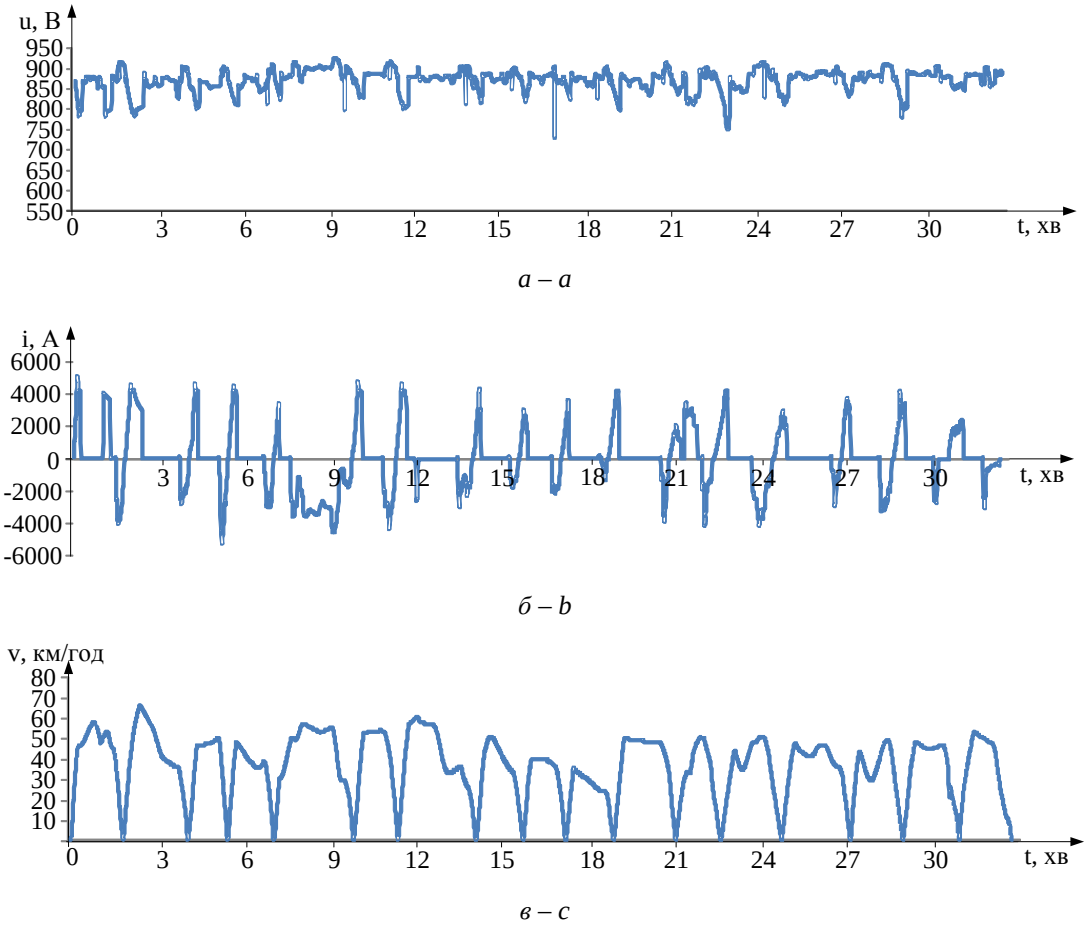


Рис. 3. Осцилограми: *а* – напруги на струмоприймачі; *б* – струму поїзда; *в* – та швидкості руху поїзда під час його експлуатації між станціями «Академмістечко–Лісова»

Fig. 3. Oscillograms: *a* – voltage on current collectors; *b* – train current; *c* – and the speed of the train (in) when its operation between stations «Akademmistechko– Lisova»

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

Кількість електроенергії, що споживається в режимах тяги, розраховується за формулою [7, 9, 11]:

$$A_{тяги} = \frac{U_{сер.тяги} \cdot I_{сер.тяги} \cdot t_{тяги}}{3\,600 \cdot 1\,000}. \quad (1)$$

Кількість електроенергії, що генерується до контактної мережі, розраховується за формулою [5]:

$$A_{рек} = \frac{U_{сер.рек} \cdot I_{сер.рек} \cdot t_{рек.}}{3600 \cdot 1\,000}. \quad (2)$$

Кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (надлишкова енергія), розраховується за формулою [5, 11]:

$$A_R = \frac{U_{сер.R} \cdot I_{сер.R} \cdot t_{рек.}}{3\,600 \cdot 1\,000}. \quad (3)$$

doi 10.15802/stp2017/112934 © А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)

Коефіцієнт рекуперації визначається за відношенням згенерованої електроенергії до контактної мережі під час рекуперативного гальмування до спожитої електроенергії в режимі тяги [7]:

$$k_{\text{рек}} = \frac{A_{\text{рек.}}}{A_{\text{тяги}}}. \quad (4)$$

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

$$k_R = \frac{A_R}{(A_{\text{рек.}} + A_R)}. \quad (5)$$

Коефіцієнт, який показує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування:

$$k_r = \frac{A_R}{A_{\text{тяги}}}. \quad (6)$$

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

Питомі витрати електроенергії на тягу визначаються за формулою [5, 11]:

$$a_{\text{пит}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3\,600 \cdot m \cdot L}, \quad (7)$$

де m – маса поїзда; L – довжина ділянки.

Питомі витрати електроенергії на тягу з урахуванням електроенергії рекуперації визначаються за формулою [5]:

$$a_{\text{пит.рек}} = \frac{U_{\text{сер.тяги}} \cdot I_{\text{сер.тяги}} \cdot t_{\text{тяги}}}{3\,600 \cdot m \cdot L} - \frac{U_{\text{сер.рек}} \cdot I_{\text{сер.рек}} \cdot t_{\text{рек}}}{3\,600 \cdot m \cdot L}. \quad (8)$$

Результати

Результати розрахунків, виконаних за виразами (1)–(6), наведено в табл. 1–2.

Кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі та виділеної на гальмівних резисторах електроенергії, а також їх відношення під час заданих штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену до систем рекуперації між кінцевими станціями «Лісова–Академмістечко–Лісова», зображено у вигляді діаграм на рис. 4–8.

Результати розрахунків питомих витрат на тягу для штатних режимів експлуатації поїзда приведено в табл. 3.

Таблиця 1

Результати розрахунків енергетичних показників при «піковому» графіку руху поїзда

Table 1

Calculations results of energy indices at the «peak» schedule of train movement

Досліджувана ділянка	Номінальне/максимальне завантаження поїзда (кількість енергії та поправочні коефіцієнти)					
	$A_{\text{тяги}}$, кВт·год	$A_{\text{рек}}$, кВт·год	A_R, кВт·год	$k_{\text{рек}}$	k_R	k_r
Лісова–Чернігівська	12,28/14,6	3,29/2,32	5,21/7,74	0,27/0,16	0,61/0,77	0,42/0,53
Чернігівська–Дарниця	15,34/15,92	4,94/3,57	1,33/4,1	0,32/0,22	0,21/0,53	0,09/0,26
Дарниця–Лівобережна	13,65/13,63	3,4/3,56	2,67/3,09	0,25/0,26	0,44/0,46	0,2/0,23
Лівобережна–Гідропарк	14,26/18,68	5,03/3,63	3,56/6,88	0,35/0,19	0,41/0,65	0,25/0,37
Гідропарк–Дніпро	23,71/23,52	5,25/3,14	3,04/4,93	0,22/0,13	0,37/0,61	0,13/0,21

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)

Закінчення таблиці 1

End of table 1

Досліджувана ділянка	Номінальне/максимальне завантаження поїзда (кількість енергії та поправочні коефіцієнти)					
	$A_{тяги}$, кВт·год	$A_{рек}$, кВт·год	A_R, кВт·год	$k_{рек}$	k_R	k_r
Дніпро–Арсенальна	3,38/2,28	4,28/3,21	4,17/5,01	1,27/1,41	0,49/0,61	1,23/2,2
Арсенальна–Хрещатик	13,92/13,94	1,49/1,82	3,1/5,05	0,11/0,13	0,68/0,74	0,22/0,36
Хрещатик–Театральна	11,06/14,18	3,77/1,84	1,52/5,85	0,34/0,13	0,29/0,76	0,14/0,41
Театральна–Університет	11,3/13,55	2,79/2,4	0,85/3,02	0,25/0,18	0,23/0,45	0,08/0,22
Університет–Вокзальна	9,3/14,45	2,94/0,95	0,21/5,59	0,32/0,07	0,07/0,85	0,02/0,39
Вокзальна–КПІ	14,4/20,53	0,88/2,1	2,1/4,38	0,06/0,1	0,7/0,68	0,15/0,21
КПІ–Шулявська	15,78/18,37	3,76/4,46	0,68/2,85	0,24/0,24	0,15/0,4	0,04/0,16
Шулявська–Берестейська	79,27/84,09	3,35/2,58	0,16/2,94	0,04/0,03	0,05/0,55	0/0,03
Берестейська–Нивки	15,78/21,82	4,22/7,08	3,14/4,56	0,27/0,32	0,43/0,39	0,2/0,21
Нивки–Святошин	13,15/9,66	2,42/2,09	0,94/1,17	0,18/0,22	0,28/0,36	0,07/0,12
Святошин–Житомирська	6,04/11,95	5,47/3,56	3,08/8,7	0,91/0,3	0,36/0,71	0,51/0,73
Житомирська–Академмістечко	4,98/4,15	1,31/2,89	3,03/0,78	0,26/0,7	0,7/0,21	0,61/0,19
Академмістечко–Житомирська	24,22/25,22	0,96/1,51	5,79/5,84	0,04/0,06	0,86/0,79	0,24/0,23
Житомирська–Святошин	24,14/25,92	3,44/3,17	3,61/0,85	0,14/0,12	0,51/0,21	0,15/0,03
Святошин–Нивки	14,15/12,05	8,25/2,09	1,93/5,59	0,58/0,17	0,19/0,73	0,14/0,46
Нивки–Берестейська	15,5/17,85	2,68/0,78	4,33/7,89	0,17/0,04	0,62/0,91	0,28/0,44
Берестейська–Шулявська	4,69/5,72	21,15/13,08	23,2/32,28	4,51/2,29	0,52/0,71	4,95/5,64
Шулявська–КПІ	9,28/17,83	1,26/4,04	3,93/5,82	0,14/0,23	0,76/0,59	0,42/0,33
КПІ–Вокзальна	14,85/16,2	2,69/4,0	2,32/2,35	0,18/0,25	0,46/0,37	0,16/0,15
Вокзальна–Університет	8,08/10,44	1,49/3,15	0,66/0,74	0,18/0,3	0,31/0,19	0,08/0,07
Університет–Театральна	8,18/10,39	1,53/2,44	0,82/1,53	0,19/0,23	0,35/0,39	0,1/0,15
Театральна–Хрещатик	11,44/12,93	0,5/1,73	3,64/3,76	0,04/0,13	0,88/0,68	0,32/0,29
Хрещатик–Арсенальна	12,58/13,88	1,72/3,97	1,62/0,86	0,14/0,29	0,49/0,18	0,13/0,06
Арсенальна–Дніпро	22,42/22,32	1,73/0,67	2,62/3,11	0,08/0,03	0,6/0,82	0,12/0,14
Дніпро–Гідропарк	13,1/15,91	2,33/3,49	8,88/10,2	0,18/0,22	0,79/0,75	0,68/0,64
Гідропарк–Лівобережна	13,1/17,75	1,83/3,17	1,29/2,47	0,14/0,18	0,41/0,44	0,1/0,14
Лівобережна–Дарниця	12,45/12,83	3,84/2,58	3,37/4,52	0,31/0,2	0,47/0,64	0,27/0,35
Дарниця–Чернігівська	11,34/11,0	3,11/1,0	2,8/4,19	0,27/0,09	0,47/0,81	0,25/0,38
Чернігівська–Лісова	16,28/15,4	2,08/1,76	4,22/4,24	0,13/0,11	0,67/0,71	0,26/0,28

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)

Таблиця 2

Результати розрахунків енергетичних показників при «непіковому» графіку руху поїзда

Table 2

Calculations results of energy indices at the «off-peak» schedule of train movement

Досліджувана ділянка	Мінімальне/номінальне/максимальне завантаження поїзда та відповідні коефіцієнти					
	$A_{тяги}$, кВт·год	$A_{рек}$, кВт·год	A_R, кВт·год	$k_{рек}$	k_R	k_r
Лісова–Чернігівська	7,17/9,68/8,46	0,86/2,92/1,05	1,98/1,84/4,28	0,12/0,3/0,12	0,7/0,39/0,8	0,28/0,19/0,51
Чернігівська–Дарниця	6,45/10,48/11,11	1,76/2,13/1,91	1,74/0,57/2,19	0,27/0,2/0,17	0,5/0,21/0,53	0,27/0,05/0,2
Дарниця–Лівобережна	7,89/16,44/8,98	2,45/0,81/1,85	0,63/0,42/1,64	0,31/0,05/0,21	0,2/0,34/0,47	0,08/0,03/0,18
Лівобережна–Гідропарк	7,35/15,24/9,8	1,13/3,1/1,23	1,98/1,08/4,7	0,15/0,2/0,13	0,64/0,26/0,79	0,27/0,07/0,48
Гідропарк–Дніпро	13,61/22,82/21,81	0,52/1,93/2,01	1,5/0,5/4,74	0,04/0,08/0,09	0,74/0,21/0,7	0,11/0,02/0,22
Дніпро–Арсенальна	3,64/4,63/3,48	2,72/3,43/5,36	3,16/6,25/3,61	0,75/0,74/1,54	0,54/0,65/0,4	0,87/1,35/1,04
Арсенальна–Хрещатик	8,76/12,03/12,77	1,0/2,85/3,13	1,35/1,64/1,76	0,11/0,24/0,25	0,57/0,37/0,36	0,15/0,14/0,14
Хрещатик–Театральна	4,87/8,18/8,25	1,09/3,04/2,0	0,93/1,13/2,11	0,22/0,37/0,24	0,46/0,27/0,51	0,19/0,14/0,26
Театральна–Університет	5,91/8,14/9,2	1,12/2,14/1,64	1,13/1,07/2,5	0,19/0,26/0,18	0,5/0,33/0,6	0,19/0,13/0,27
Університет–Вокзальна	6,22/8,47/9,85	0,32/1,62/1,46	1,52/1,4/2,43	0,05/0,19/0,15	0,83/0,46/0,62	0,24/0,17/0,25
Вокзальна–КПІ	10,84/16,19/16,75	2,2/3,8/2,54	1,13/0,96/2,2	0,2/0,23/0,15	0,34/0,2/0,46	0,1/0,06/0,13
КПІ–Шулявська	8,68/11,67/13,05	1,91/2,74/3,89	0,75/0,67/0,86	0,22/0,23/0,3	0,28/0,2/0,18	0,09/0,06/0,07
Шулявська–Берестейська	52,39/78,21/81,31	1,19/2,95/3,64	2,29/1,13/0,65	0,02/0,04/0,04	0,66/0,28/0,15	0,04/0,01/0,01
Берестейська–Нивки	8,81/11,96/17,68	1,61/3,47/4,73	1,58/3,69/4,31	0,18/0,29/0,27	0,5/0,52/0,48	0,18/0,31/0,24
Нивки–Святошин	9,07/13,61/13,69	0,33/0,65/2,56	2,11/2,99/1,2	0,04/0,05/0,19	0,86/0,82/0,32	0,23/0,22/0,09
Святошин–Житомирська	5,34/7,83/6,25	0,69/1,05/2,28	5,47/8,7/6,41	0,13/0,13/0,36	0,89/0,89/0,74	1,02/1,11/1,03

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)

Закінчення таблиці 2

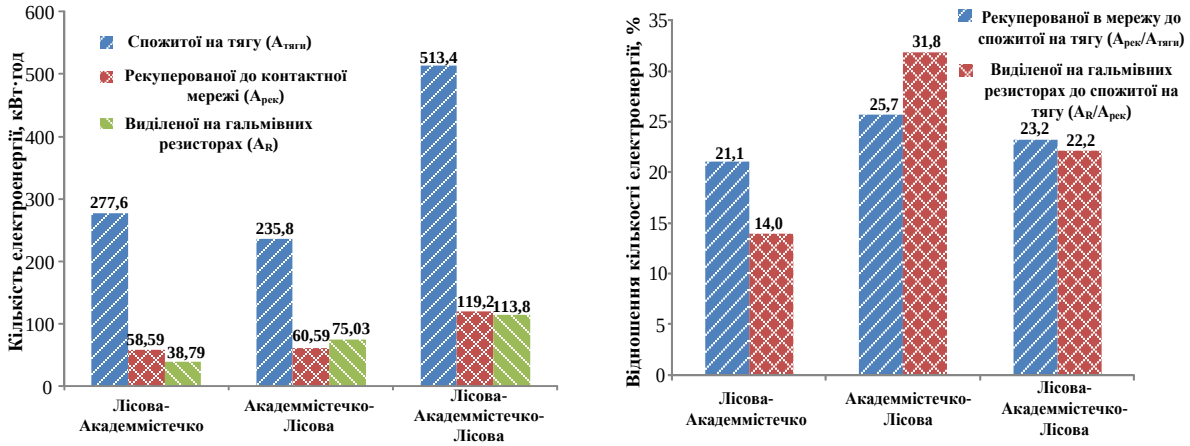
End of table 2

Досліджувана ділянка	Мінімальне/номінальне/максимальне завантаження поїзда та відповідні коефіцієнти					
	$A_{тяги}$, кВт·год	$A_{рек}$, кВт·год	A_R, кВт·год	$k_{рек}$	k_R	k_r
Житомирська–Академмістечко	1,65/2,63/2,88	1,07/1,38/1,46	0,75/1,06/1,64	0,65/0,52/0,51	0,41/0,43/0,53	0,45/0,4/0,57
Академмістечко–Житомирська	15,17/22,04/19,03	1,59/1,16/2,34	2,02/4,38/1,44	0,1/0,05/0,12	0,56/0,79/0,38	0,13/0,2/0,08
Житомирська–Святошин	14,45/24,63/24,56	2,06/2,44/2,9	0,81/1,5/0,57	0,14/0,1/0,12	0,28/0,38/0,16	0,06/0,06/0,02
Святошин–Нивки	6,31/10,48/8,47	0,13/5,41/2,4	4,18/2,63/4,06	0,02/0,52/0,28	0,97/0,33/0,63	0,66/0,25/0,48
Нивки–Берестейська	11,07/11,43/13,39	3,23/3,75/4,43	1,99/1,69/1,92	0,29/0,33/0,33	0,38/0,31/0,3	0,18/0,15/0,14
Берестейська–Шулявська	4,94/5,14/5,11	13,9/21,25/20,98	11,4/23,01/24,95	2,81/4,13/4,11	0,45/0,52/0,54	2,31/4,48/4,88
Шулявська–КПІ	7,53/14,01/11,78	1,58/2,46/2,63	0,7/5,74/3,97	0,21/0,18/0,22	0,2/0,7/0,6	0,09/0,41/0,34
КПІ–Вокзальна	11,07/14,76/15,21	1,24/2,93/3,04	0,52/2,46/1,96	0,11/0,2/0,2	0,3/0,46/0,39	0,05/0,17/0,13
Вокзальна–Університет	6,86/8,04/8,15	1,13/1,49/1,86	0,77/0,84/0,67	0,16/0,19/0,23	0,41/0,36/0,26	0,11/0,1/0,08
Університет–Театральна	5,81/8,67/7,94	1,53/2,27/1,21	1,04/0,94/1,49	0,26/0,26/0,15	0,4/0,29/0,55	0,18/0,11/0,19
Театральна–Хрещатик	6,01/6,7/8,14	0,69/0,73/1,75	0,37/0,22/0,38	0,11/0,11/0,21	0,35/0,23/0,18	0,06/0,03/0,05
Хрещатик–Арсенальна	11,05/12,76/13,83	1,23/0,94/2,01	1,76/2,44/2,99	0,11/0,07/0,15	0,59/0,72/0,6	0,16/0,19/0,22
Арсенальна–Дніпро	15,76/22,94/23,13	1,5/2,97/1,44	1,1/1,6/3,06	0,1/0,13/0,06	0,42/0,35/0,68	0,07/0,07/0,13
Дніпро–Гідропарк	9,87/13,61/10,49	2,76/3,95/3,75	3,51/7,98/6,11	0,28/0,29/0,36	0,56/0,67/0,62	0,36/0,59/0,58
Гідропарк–Лівобережна	8,71/12,6/15,07	1,34/1,85/0,96	1,21/0,93/3,7	0,15/0,15/0,06	0,47/0,33/0,79	0,14/0,07/0,25
Лівобережна–Дарниця	7,32/10,44/9,96	0,88/1,4/1,89	2,81/4,29/3,53	0,12/0,13/0,19	0,76/0,75/0,65	0,38/0,41/0,35
Дарниця–Чернігівська	9,91/12,68/11,52	1,43/1,09/0,41	3,17/0,99/5,72	0,14/0,09/0,04	0,69/0,48/0,93	0,32/0,08/0,5
Чернігівська–Лісова	8,36/14,99/11,83	1,02/1,73/0,58	0,75/0,99/2,82	0,12/0,12/0,05	0,42/0,36/0,83	0,09/0,07/0,24

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

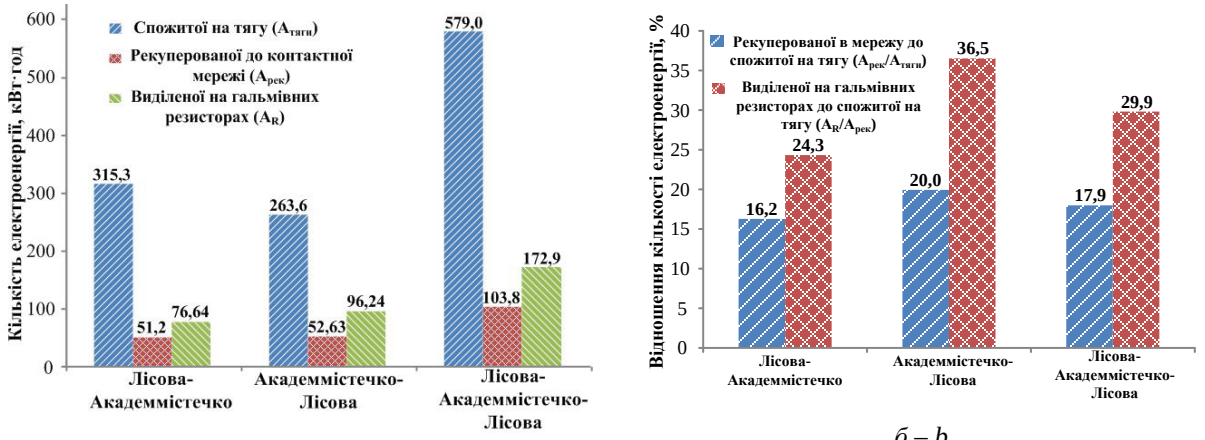
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)



а – a *б – b*

Рис. 4. Витрати енергії:
а – кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; *б* – та співвідношення, видів енергії під час «пікового» графіку руху поїзда з номінальним завантаженням

Fig. 4. Energy consumption:
a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; *b* – and their relation, types of energy at «peak» schedule of train movement with a nominal load



а – a *б – b*

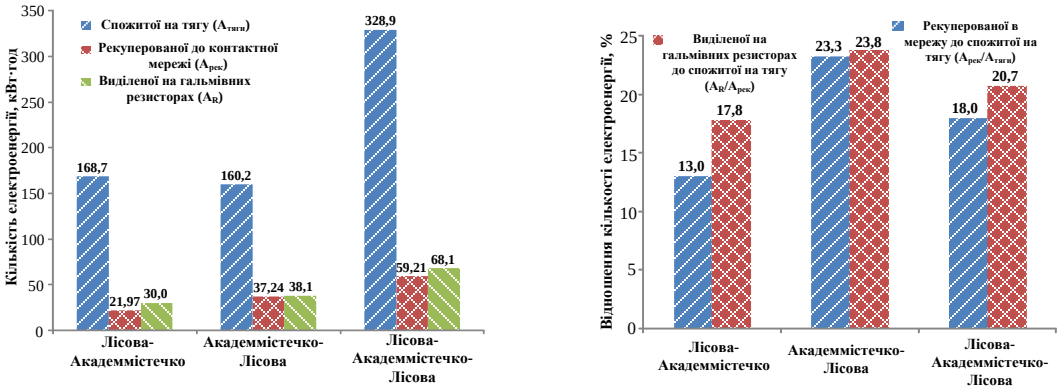
Рис. 5. Витрати енергії:
а –кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; *б* – та співвідношення під час «пікового» графіку руху поїзда з максимальним завантаженням

Fig. 5. Energy consumption:
a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; *b* – and their relation at the «peak» schedule of train movement with a maximum load

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

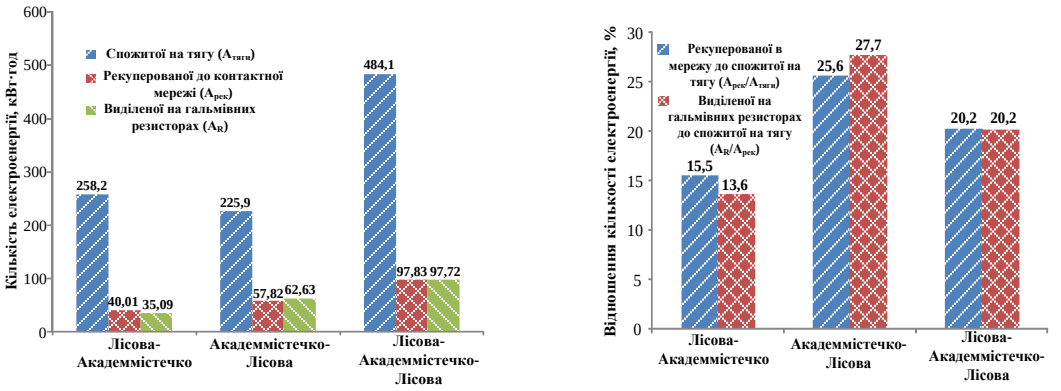
Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)



а – a *б – b*

Рис. 6. Витрати енергії:
а –кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; *б* – та їх відношення під час «непікового» графіку руху поїзда з мінімальним завантаженням

Fig. 6. Energy consumption:
a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; *b* – and their relation at the «off-peak» schedule of train movement with a minimum load



а – a *б – b*

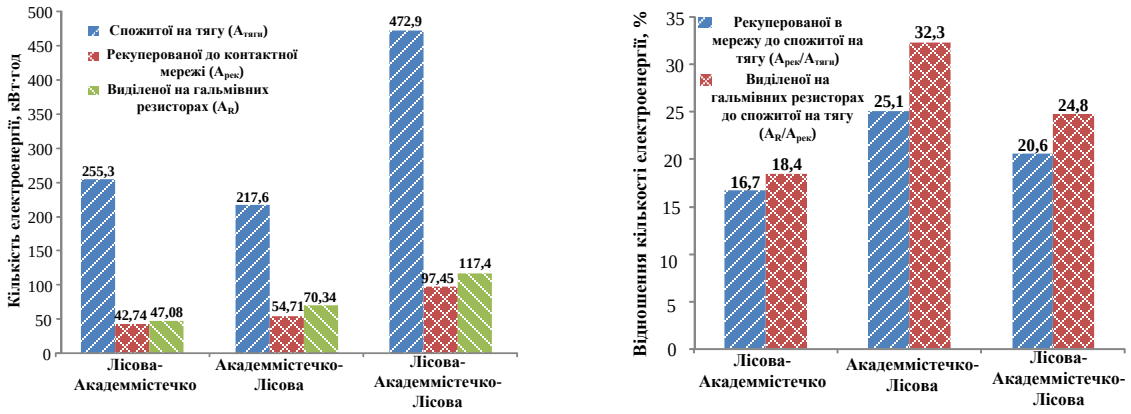
Рис. 7. Витрати енергії:
а –кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; *б* – та їх відношення під час «непікового» графіку руху поїзда з номінальним завантаженням

Fig. 7. Energy consumption:
a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; *b* – and their relation at the «off-peak» schedule of train movement with a nominal load

doi 10.15802/stp2017/112934 © А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)



а – a *б – b*

Рис. 8. Витрати енергії:
а –кількість спожитої на тягу, рекуперованої до контактної мережі і виділеної на гальмівних резисторах електроенергії; *б* – та їх відношення під час «непікового» графіку руху поїзда з максимальним завантаженням

Fig. 8. Energy consumption:
a – amount of energy for traction, recuperated to the contact net and dissipated in braking resistors; *b* – and their relation at the «off-peak» schedule of train movement with a maximum load

Таблиця 3

Результати розрахунків питомих витрат на тягу при «піковому» графіку руху поїзда

Table 3

Calculations results of specific costs for traction at the «peak» schedule of train movement

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

Таблиця 4

Результати розрахунків питомих витрат на тягу при «непіковому» графіку руху поїзда

Table 4

Calculations results of specific costs for traction at the «off-peak» schedule of train movement

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

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

ISSN 2307–3489 (Print), ISSN 2307–6666 (Online)

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2017, № 5 (71)

Як було вказано раніше, на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії і, відповідно, на коефіцієнти рекуперації і кількості невикористаної (надлишкової) електроенергії в основному впливають такі фактори як профіль колії, графік руху (експлуатаційна швидкість), відстань між станціями, завантаженість вагонів. Тому в даній роботі додатково здійснювався аналіз отриманих даних для визначення найбільш вагомого фактору впливу на кількість електроенергії рекуперації. Результати аналізу факторів, які впливають на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії зображені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати аналізу факторів

Table 5

Results of factors

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

doi 10.15802/stp2017/112934 © А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

Закінчення таблиці 5

End of table 5

№ 4 Шулявська–Берестейська	S=2230 м; профіль колії; m=248,7 т – номінальна завантаженість	79,27 78,21	3,51 4,29	0,04 0,05
№ 5 Театральна–Хрещатик	S=770 м; профіль колії; m=262 т – максимальна завантаженість	8,14 12,93	2,13 5,49	0,26 0,42
Змінна умова – відстань між станціями				
№ 1 Чернігівська–Дарниця Нивки–Святошин	профіль колії; $V_{сер.екс}$=39 км/год; m=262 т – максимальна завантаженість	11,11 13,69	4,1 3,76	0,37 0,27
Змінна умова – відстань між станціями				
№ 2 Лісова–Чернігівська Святошин–Нивки	профіль колії; $V_{сер.екс}$=38 км/год; m=262 т – максимальна завантаженість	8,46 8,47	5,33 6,46	0,63 0,76
№ 3 Лівобережна–Гідропарк Вокзальна–КПІ	профіль колії; $V_{сер.екс}$=50 км/год; m=248,7 т – номінальна завантаженість	15,24 16,19	4,18 4,76	0,27 0,29
№ 4 Університет–Вокзальна КПІ–Вокзальна	профіль колії; $V_{сер.екс}$=47 км/год; m=262 т – максимальна завантаженість	14,45 16,2	6,54 6,35	0,45 0,39
№ 5 Хрещатик–Театральна Дарниця–Чернігівська	профіль колії; $V_{сер.екс}$=41 км/год; m=262 т – максимальна завантаженість	14,18 11,00	7,69 5,19	0,54 0,47
Змінна умова – завантаженість вагонів				
№ 1 Чернігівська–Дарниця	S=1315 м; профіль колії; $V_{сер.екс}$=38 км/год	10,48 11,11	2,7 4,1	0,26 0,37
№ 2 Арсенальна–Хрещатик	S=1666 м; профіль колії; $V_{сер.екс}$=46 км/год	12,03 12,77	4,49 4,89	0,37 0,38
№ 3 Вокзальна–КПІ	S=2230 м; профіль колії; $V_{сер.екс}$=51 км/год	16,19 16,75	4,76 4,74	0,29 0,28
№ 4 Житомирська–Академмістечко	S=1445 м; профіль колії; $V_{сер.екс}$=39 км/год	2,63 2,88	2,44 3,1	0,93 1,08
№ 5 Чернігівська–Лісова	S=1218 м; профіль колії; $V_{сер.екс}$=41 км/год	14,99 11,83	2,72 3,4	0,18 0,29

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

Вагомість впливу того чи іншого фактору на ефективність процесу рекуперації запропоновано підтверджувати за допомогою коефіцієнта, який визначається як відношення загальної кількості електроенергії рекуперації під час гальмування до кількості електроенергії, спожитої на тягу. Як критерій обрано різницю між зазначеними коефіцієнтами за умови, що три фактори є незмінними, а один – змінний:

$$Q = \left| \frac{(A_{\text{рек}1} + A_{R1})}{A_{\text{тяги}1}} - \frac{(A_{\text{рек}2} + A_{R2})}{A_{\text{тяги}2}} \right| = \left| k_{\alpha 1} - k_{\alpha 2} \right|. \quad (9)$$

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

На рис. 9–12 зображено отримані значення критерію для 4-х змінних умов (на прикладі 5-х окремих дослідів для кожної умови).

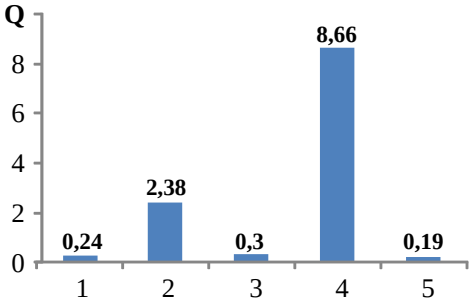


Рис. 9. Значення критерію за умови зміни профілю колії

Fig. 9. The value of the criterion when changing the profile of the track

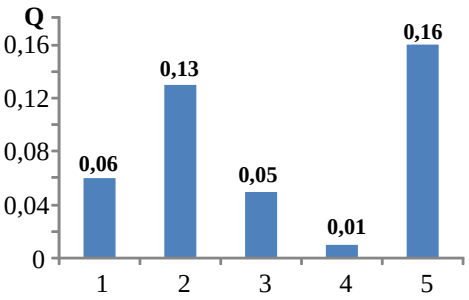


Рис. 10. Значення критерію за умови зміни графіку руху (експлуатаційної швидкості)

Fig. 10. The value of the criterion when changing the schedule (operating speed)

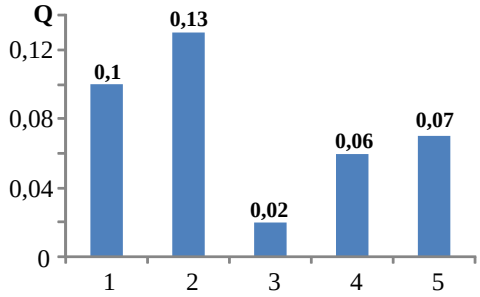


Рис. 11. Значення критерію за умови зміни відстані між станціями

Fig. 11. The value of the criterion when changing the distance between stations

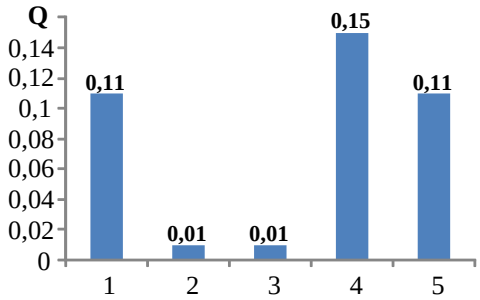


Рис. 12. Значення критерію за умови зміни завантаженості вагонів

Fig. 12. The value of the criterion when changing cars loading level

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

– максимальна кількість спожитої електроенергії ($A_{\text{тяги}}$) спостерігається на перегоні із затяжним підйомом 42 ‰ «Шулявська–Берестейська», мінімальна – на перегонах зі спусками «Дніпро–Арсенальна» (30 ‰) та «Житомирська–Академмістечко» (38 ‰) (табл. 1–2);

– найбільшу кількість рекуперованої до контактної мережі електроенергії ($A_{\text{рек}}$) та надлишкової електроенергії (A_R) зафіксовано на перегоні з затяжним спуском 42 ‰ «Берестейська–Шулявська» (табл. 1–2);

– найменшу кількість рекуперованої до контактної мережі електроенергії ($A_{\text{рек}}$) зафіксовано на перегоні «Нивки–Святошин» під час експлуатації поїзда з дотриманням «непікового» графіку руху з мінімальною завантаженістю вагонів (табл. 1–2);

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

– мінімально зафіксоване значення кількості надлишкової електроенергії (A_R) зареєстровано на перегоні «Шулявська–Берестейська» під час експлуатації поїзда з дотриманням «пікового» графіку руху з номінальною завантаженістю вагонів (табл. 1–2);

– під час експлуатації поїзда між кінцевими станціями «Лісова–Академмістечко–Лісова», залежно від штатної умови руху, кількість спожитої на тягу електроенергії змінюється в межах 328,9–579,0 кВт·год, кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі – у діапазоні 59,21–119,2 кВт·год, кількість надлишкової електроенергії, що розсіюється на резисторах у вигляді теплоти – у межах 68,1–172,9 кВт·год (рис. 4–8). Отже, впровадження систем рекуперації на рухомому складі дозволяє повернути в контактну мережу на рівні 17,9–23,2 % електроенергії, що споживається на тягу (рис. 4–8), а також завдяки цим системам з'являються резерви енергозбереження за рахунок ефективного використання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування на рівні 20,2–29,9 %, що споживається на тягу (рис. 4–8).

– найбільші резерви енергозбереження спостерігаються під час «пікового» графіку руху з максимальною завантаженістю вагонів; найменші – при «непіковому» графіку руху та мінімальній завантаженості вагонів (рис. 4–8);

– максимальне значення питомих витрат електроенергії на тягу без та з урахуванням електроенергії рекуперації зафіксовано під час дотримання «пікового» графіку руху з максимальною завантаженістю вагонів; мінімальне – під час дотримання «непікового» графіку руху з максимальною завантаженістю вагонів (табл. 3–4);

– найбільш вагомим фактором, що впливає на кількість спожитої та загальну кількість рекуперованої електроенергії, є профіль колії; інші фактори (експлуатаційна швидкість, відстань між станціями, завантаженість) є менш вагомими та мають практично однаковий вплив (табл. 5, рис. 9–12);

– різниця між відношеннями кількості загальної рекуперованої до кількості спожитої електроенергії залежно від характеру зміни профілю колії змінюється в межах 0,19–8,66; експлуатаційної швидкості – у межах 0,01–0,16; відстані між станціями – у межах 0,02–0,13; завантаженості – у межах 0,01– 0,15 (рис. 9–12).

Наукова новизна та практична значимість

Вперше обґрунтовано, що найбільш вагомим фактором, який здійснює вплив на кількісні показники електроенергії рекуперації, є профіль колії. Дістали подальшого розвитку дослідження з визначення кількісних показників електроенергії рекуперації для аналізу резерву енергозбереження. Встановлені кількісні показники надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування можуть бути використані під час створення нового або модернізації існуючого рухомого складу метрополітену, при розробці енергоефективного технічного рішення для утилізації, збереження та акумулювання цієї електроенергії.

Висновки

Аналіз результатів розрахунково-експериментальних досліджень під час заданих типових умов експлуатації рухомого складу метрополітену між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії показав наступне:

– впровадження систем рекуперації на рухомому складі дозволяє повернути в контактну мережу на рівні 17,9–23,2 % електроенергії, що споживається на тягу (рис. 5–8);

– існують резерви підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену з системами рекуперації за рахунок ефективного використання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування на рівні 20,2–29,9 %, що споживається на тягу (рис. 5–8);

– найбільш вагомим фактором, який здійснює вплив на кількість спожитої, рекуперованої до контактної мережі, а також надлишкової електроенергії, є профіль колії (рис. 9–12).

Подальші дослідження необхідно зосередити на розробці енергоефективного технічного рішення для утилізації, збереження та акумулювання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування.

doi 10.15802/stp2017/112934
© А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену / А. В. Донченко, А. О. Сулим, О. С. Сіора [та ін.] // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 3 (63). – С. 108–119. doi: 10.15802/stp2016/74732.
2. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена / В. Г. Кузнецов, О. И. Саблин, П. В. Губский, Е. Г. Колыхаев // Гірнича електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. / Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ, 2015. – № 95. – С. 68–73.
3. Бычкова, М. П. Энергосбережение в метро / М. П. Бычкова // Транспорт Российской Федерации. – 2010. – Спец. вып. : Наука и транспорт. Метрополитены будущего. – С. 67.
4. Васильев, В. А. Повышение энергетической эффективности электропоездов постоянного тока : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.22.07 / Васильев Виталий Алексеевич ; Петербург. гос. ун-т путей сообщения. – Санкт-Петербург, 2012. – 16 с.
5. Гаврилов, Я. И. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями / Я. И. Гаврилов, В. А. Мнацаканов. – Москва : Транспорт, 1986. – 229 с.
6. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» / А. В. Донченко, С. О. Мужичук, А. О. Сулим, П. О. Хозя, О. О. Мельник // Рейковий рухомий склад : зб. наук. пр. – Кременчук, 2015. – Вип. 12. – С. 48–56.
7. Костин, Н. А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н. А. Костин, А. В. Никитенко // Залізн. трансп. України. – 2014. – № 3. – С. 15–23.
8. Нікітенко, А. В. Збільшення об’єму рекуперованої електроенергії на електропоїздах постійного струму / А. В. Нікітенко, М. О. Костін // Залізн. трансп. України. – 2015. – № 3. – С. 25–31.
9. Основы электрического транспорта : учеб. для студ. высш. учеб. заведений / М. А. Слепцов, Г. П. Долаберидзе, А. В. Прокопович [и др.]. – Москва : Академия, 2006. – 464 с.
10. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Вост.-Европ. журн. передовых технологий. – 2014. – Т. 6, № 8. – С. 9–13. doi: 10.15587/1729-4061.2014.30483.
11. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 16669 (Україна). Програмний комплекс для збору, відображення, запису та подальшої математичної обробки даних з аналого-цифрових перетворювачів у комп’ютеризованих вимірювальних комплексах («ЕЛЕКТРО») / С. Д. Сичов ; ДП «УкрНДІВ» ; зареєстр. 19.05.2006.
12. Сулим, А. А. Повышение эффективности энергообеспечения подвижного состава метрополитена с системами рекуперации путем применения емкостных накопителей энергии : дис. … канд. техн. наук : 05.22.07 / Сулим Андрей Александрович ; Гос. предприятие «Гос. науч. исслед. центр ж.-д. трансп. Украины». – Киев, 2015. – 188 с.
13. Улитин, В. Г. Проблема использования избыточной энергии рекуперации на городском электрическом транспорте / В. Г. Улитин // Коммунальное хозяйство городов. Серия: Техн. науки : науч.-техн. сб. / Харк. нац. акад. город. хоз-ва. – Харьков, 2009. – Вып. 88. – С. 266–271.
14. Шевлюгин, М. В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии / М. В. Шевлюгин, К. С. Желтов // Наука и техника транспорта. – 2008. – № 1. – С. 15–20.
15. Щуров, Н. И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / Н. И. Щуров, К. В. Щеглов, А. А. Штанг // Сб. науч. тр. Новосиб. гос. техн. ун-та. – Новосибирск, 2008. – № 1 (51). – С. 99–104.
16. Ярещенко, С. А. Обеспечение энергоэффективности функционирования создаваемого электротехнического комплекса Красноярского метрополитена : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.09.03 / Ярещенко Семен Александрович ; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2009. – 19 с.
17. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems / X. Yang, A. Chen, X. Li, B. Ning, T. Tang // Transportation Research. Part C. Emerging Techologies. – 2015. – Vol. 57. – P. 13–29. doi: 10.1016/j.trc.2015.05.002.
18. Iannuzzi, D. The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines / D. Iannuzzi, E. Pagano, P. Tricoli // Energies. – 2013. – Vol. 6. – Iss. 4. – P. 1802–1820. doi: 10.3390/en6041802.

doi 10.15802/stp2017/112934 © А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

19. Sevilla, M. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage / M. Sevilla, R. Mokaya // Energy & Environmental Science. – 2014. – Vol. 7. – Iss. 4. – P. 1250–1280. doi: 10.1039/C3EE43525C.
20. Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line / R. Teymourfar, B. Asaei, H. Iman-Eini, R. Nejati fard // Energy Conversion and Management. – 2012. – Vol. 56. – P. 206–214. doi: 10.1016/j.enconman.2011.11.019.

А. А. СУЛИМ[1*], С. А. МУЖИЧУК[2], П. А. ХОЗЯ[3], А. А. МЕЛЬНИК[4], В. В. ФЕДОРОВ[5]

[1*]Научно-исследовательская лаборатория электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники, Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, эл. почта sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971
[2]Публичное акционерное общество «Крюковский вагоностроительный завод», ул. И. Приходько, 139, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (067) 535 64 96, эл. почта zgk_metro@kvsz.com, ORCID 0000-0002-2653-1622
[3]Научно-исследовательская лаборатория электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники, Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, эл. почта pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032
[4]Научно-исследовательская лаборатория электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники», Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения, ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, эл. почта shurik110982@gmail.com, ORCID 0000-0001-8964-4790
[5]Научно-исследовательская лаборатория грузового и специального подвижного состава, Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 13 84, эл. почта F.vladimir.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0963-7265

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ШТАТНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА С СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦИИ

Цель. По результатам анализа существующих исследований установлено, что в данное время проблема повышения энергоэффективности подвижного состава метрополитена становится особенно актуальной и требует своевременного решения. Известно, что внедрение систем рекуперативного торможения на подвижном составе позволит в значительной мере решить эту проблему. Обосновано, что одним из ключевых вопросов при внедрении вышеобозначенных систем остаются исследования по эффективности использования электроэнергии рекуперативного торможения. Цель работы – оценка количества избыточной электроэнергии рекуперативного торможения при штатных условиях эксплуатации подвижного состава с системами рекуперации для анализа резерва энергосбережения. **Методика.** Используя результаты экспериментальных исследований энергообменных процессов при штатных условиях эксплуатации подвижного состава метрополитена с системами рекуперации, а также применяя статистические методы обработки данных, определены количественные показатели электроэнергии, потребляемой на тягу, рекуперируемой в контактную сеть и выделяемой на тормозных резисторах (избыточной). **Результаты.** По результатам анализа исследований при заданных штатных условиях эксплуатации подвижного состава метрополитена на Святошинско-Броварской линии КП «Киевский метрополитен» установлено следующее: 1) внедрение систем рекуперации на подвижном составе позволяет возвратить в контактную сеть на уровне 17,9–23,2 % электроэнергии, потребляемой на тягу; 2) существуют резервы повышения энергоэффективности подвижного состава с системами рекуперации на уровне 20,2–29,9 % электроэнергии, потребляемой на тягу. **Научная новизна.** Впервые обосновано, что наиболее весомым фактором, который влияет на количественные показатели электроэнергии рекуперации, является профиль пути. Предложено в качестве количественной оценки использовать коэффициенты, которые показывают количество и резервы неиспользованной (избыточной) электроэнергии. Получили дальнейшее развитие исследования по определению количественных показателей электроэнергии рекуперации для анализа резервов энергосбережения. **Практическая значимость.** Полученные количественные показатели избыточной электроэнергии рекуперативного торможения могут быть использованы при создании нового или модернизации существующего подвижного состава метрополитена в

doi 10.15802/stp2017/112934 © А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

случае разработки энергоэффективного технического решения для утилизации, сохранения и аккумулирования этой электроэнергии.

Ключевые слова: рекуперативное торможение; подвижной состав метрополитена; система рекуперации; энергосбережение; энергоэффективность

A. O. SULYM[1*], S. O. MUZHYCHUK[2], P. O. KHOZYA[3], O. O. MELNYK[4], V. V. FEDOROV[5]

[1*]Research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles, State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute», I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (05366) 6 20 43, e-mail sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971
[2]Public Joint Stock Company «Kryukov Railway Car Building Works», I. Prikhodko St., 139, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (067) 535 64 96, e-mail zgk_metro@kvsz.com, ORCID 0000-0002-2653-1622
[3]Research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles, State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute», I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (05366) 6 20 43, e-mail pavel.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8948-6032
[4]Research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles, State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute», I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (05366) 6 20 43, e-mail shurik110982@gmail.com, ORCID 0000-0001-8964-4790
[5]Research laboratory of freight and special rolling stock, State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute», 33, I. Prikhodko St., Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (05366) 6 13 84, e-mail F.vladimir.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0963-7265

STUDY ON ENERGY EXCHANGE PROCESSES IN NORMAL OPERATION OF METRO ROLLING STOCK WITH REGENERATIVE BRAKING SYSTEMS

Purpose. The analysis of the existing studies showed that the increasing of energy efficiency of metro rolling stock becomes especially important and requires timely solutions. It is known that the implementation of regenerative braking systems on rolling stock will allow significantly solving this problem. It was proved that one of the key issues regarding the introduction of the above-mentioned systems is research on efficient use of electric energy of regenerative braking. The purpose of the work is to evaluate the amount of excessive electric power of regenerative braking under normal operation conditions of the rolling stock with regenerative braking systems for the analysis of the energy saving reserves. **Methodology**. Quantifiable values of electrical energy consumed for traction, returned to the contact line and dissipated in braking resistors (excessive energy) are determined using results of experimental studies of energy exchange processes under normal operating conditions of metro rolling stock with regenerative systems. Statistical methods of data processing were applied as well. **Findings.** Results of the studies analysis of metro rolling stock operation under specified conditions in Sviatoshinsko-Brovarskaia line of KP «Kyiv Metro system» stipulate the following: 1) introduction of regenerative braking systems into the rolling stock allows to return about 17.9-23.2% of electrical energy consumed for traction to the contact line; 2) there are reserves for improving of energy efficiency of rolling stock with regenerative systems at the level of 20.2–29.9 % of electrical energy consumed for traction. **Originality.** For the first time, it is proved that the most significant factor that influences the quantifiable values of the electrical energy regeneration is a track profile. It is suggested to use coefficients which indicate the amount and reserves of unused (excessive) electrical energy for quantitative evaluation. Studies on determination of the quantifiable values of electricity recovery for analysis of energy saving reserve showed prospects for further development. **Practical value.** The obtained qualified values of excessive electric energy of regenerative braking can be applicable to construction of new or upgrading of the existing metro rolling stock provided that energy efficient technical solution for the utilization, preservation and storage of such electrical energy is developed.

Key words: regenerative braking; metro rolling stock; regenerative system; energy saving, energy efficiency

REFERENCES

1. Donchenko, A. V., Sulym, A. O., Siora, O. S., Melnyk, O. O., & Fedorov, V. V. (2016). Analysis of energy saving and energy efficiency issues during operation of the metro rolling stock. *Science and Transport Progres, 3* (63), 108-119. doi:10.15802/stp2016/74732

doi 10.15802/stp2017/112934 © А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017

2. Kuznetsov, V. G., Sablin, O. I., Gubskiy, P. V., & Kolykhaev, Y. G. (2015). Analiz rezervov energosberezheniya pri vnedrenii sistemy rekuperatsii energii na poyezdakh Dnepropetrovskogo metropolitena. *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka, 95*, 68-73.
3. Bychkova, M. P. (2010). Energosberezheniye v metro. Science and Transport. Subways future [Special issue]. *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 67.
4. Vasilyev, V. A. (2012). *Energy efficiency of electric trains of direct current*. (PhD thesis). Available from Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg.
5. Gavrilov, Y. I., & Mnatsakanov, V. A. (1986). *Vagony metropolitena s impulsnymi preobrazovatelyami.* Moscow: Transport.
6. Donchenko, A. V., Muzhychuk, S. O., Sulym, A. O., Khozya, P. O., & Melnyk, O. O. (2015). A study of energy efficiency of a modernized train of the metro production of «KRCBW» PJSC. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovyi rukhomyi sklad», 12*, 48-56.
7. 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.
8. Nikitenko, A. V., & Kostin, M. O. (2015). Increasing the amount of recycled electric trains in DC. *Railway transport of Ukraine, 3*, 25-31.
9. Sleptsov, M. A., Dolaberidze, G. P., Prokopovich, A. V., Savina, T. I., & Tulupov, V. D. (2006). *Osnovy elektricheskogo transporta*. [textbook]. Moscow: Akademiya.
10. Sablin, O. I. (2014). Study of the efficiency of the electric energy recovery process in the subway. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6*, 8 (72), 9-13. doi:10.15587/1729-4061.2014.30483
11. Sychov, S. D. (2006). *The Certificate of Registration of Copyright No. 16669*. Kyiv: State Intellectual Property Service of Ukraine.
12. Sulim, A. A. (2015). *Improvement of power supply the efficiency of the metro rolling stock equipped with recuperation systems by using a capacitive energy storage*. (PhD thesis). Derzhavniy naukovo-doslidniy centr zaliznichnogo transportu Ukrayini, Kyiv.
13. Ulitin, V. G. (2009). Problem of excessive energy recovery for urban electric transport. *Municipal Economy of Cities, 88*, 266-271.
14. 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 in Transport, 1*, 15-20.
15. Shchurov, N. I., Shcheglov, K. V., & Shtang, A. A. (2008). Primeneniye nakopiteley energii v sistemakh elektricheskoy tyagi. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU, 1* (51), 99-104.
16. Yareshchenko, S. A. (2009). *Obespecheniye energoeffektivnosti funktsionirovaniya sozdavayemogo elektrotekhnicheskogo kompleksa Krasnoyarskogo metropolitena*. (PhD thesis). Omsk State Technical University.
17. Yang, X., Chen, A., Li, X., Ning, B., & Tang, T. (2015). An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems. *Transportation Research Part C. Emerging Techologies, 57*, 13-29. doi:10.1016/j.trc.2015.05.002
18. Iannuzzi, D., Pagano, E., Tricoli, P. (2013). The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines. *Energies, 6* (4), 1802-1820. doi:10.3390/en6041802
19. Sevilla, M., Mokaya, R. (2014). Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage. *Energy & Environmental Science, 7* (4), 1250-1280. doi:10.1039/C3EE43525C
20. Teymourfar, R., Asaei, B., Iman-Eini, H., & Nejati fard, R. (2012). Stationary super-capacitor energy storage system to save regenerative braking energy in a metro line. *Energy Conversion and Management, 56*, 206-214. doi:10.1016/j.enconman.2011.11.019

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О. В. Фоміним (Україна); к.т.н., ст.наук.спів., акад. ТАУ А. В. Донченко (Україна); д.т.н., проф. А. М. Афанасовим (Україна)

Надійшла до редколегії: 10.05.2017
Прийнята до друку: 31.08.2017

 © А. О. Сулим, С. О. Мужичук, П. О. Хозя, О. О. Мельник, В. В. Федоров, 2017