

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, кафедра інтелектуальних систем електропостачання, 49010, м. Дніпро, вул. Лазаряна, 2, тел. (056) 793-19-11, ел. пошта: vkuz@i.ua, olegsss@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0003-4165-1056, orcid.org/0000-0001-6784-648X

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В ЗАДАЧАХ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРАЦІЇ

Вступ

Одним з важливих енергоощадних заходів на електрифікованому транспорті є ефективне використання енергії рекуперації, що при раціональних режимах руху транспортних засобів дозволяє знижувати енергоємність перевізного процесу в різних видах руху на 10...40% [1, 2].

Проте у зв'язку із часовим дисбалансом процесів споживання і генерації енергії різними транспортними засобами, що знаходяться на ділянці в тягових і рекуперативних режимах, показник відновлення енергії при існуючих системах енергозабезпечення транспорту на сьогодні є незначним. Середній показник рекуперації енергії, наприклад по мережі залізниць постійного струму, зараз не перевищує 2...3 % [3-5], що особливо помітно при зниженні розмірів руху на ділянках.

Актуальність і постановка задачі

Вдосконалення систем електропостачання електрифікованого транспорту з метою підвищення ефективності використання енергії рекуперації, а саме впровадження накопичувачів енергії (НЕ) на тягових підстанціях (ТП), інверторних агрегатів (ІА) та регуляторів напруги (РН) на шинах ТП потребує розвитку підходів щодо визначення технічного та економічно доцільного потенціалу енергозбереження при рекуперації для існуючих і перспективних систем транспорту. Це дозволить обирати науково обґрунтовані технології та енергозберігаюче обладнання з мінімальними вартісними показниками та надлишковою потужністю в залежності від експлуатаційних показників ділянок.

Мета роботи

Розробка наукового методу визначення потенціалу енергозбереження в існуючих і перспективних системах електротранспорту для підвищення ефективності використання енергії рекуперації.

Огляд літератури

Кількість електроенергії, яка може бути генерована транспортним засобом при рекуперативному гальмуванні для зниження чи обмеження швидкості, визначається зменшенням його кінетичної енергії за вирахуванням роботи з подолання сил опору руху і дорівнює [1, 2]

$$W_{\text{рек}} = (0,01073(1 + \gamma)Q(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2) - 2,725Q(w_0 \pm i_{\text{екв}})S)\eta_{\text{рек}}, \quad (1)$$

де Q – маса поїзда; $(1 + \gamma)$ – коефіцієнт інерції його обертових мас; $v_{\text{п}}$, $v_{\text{к}}$ – швидкість відповідно на початку і наприкінці гальмування; w_0 – основний питомий опір руху поїзда при середній швидкості на ділянці гальмування; $i_{\text{екв}}$ – еквівалентний ухил на ділянці гальмування; S – довжина гальмівного шляху; $\eta_{\text{рек}}$ – ККД електропостачального складу (ЕПС) в режимі рекуперації.

При гальмуванні поїздів для зниження швидкості руху на прямих ділянках повна робота сил опору руху значно менше зміни кінетичної енергії, тому (1) може бути записано як

$$W_{\text{рек}} = 0,01073(1 + \gamma)Q(v_{\text{п}}^2 - v_{\text{к}}^2)\eta_{\text{рек}}. \quad (2)$$

При пригальмовуванні поїзду для підтримки заданої швидкості руху (при $v \approx \text{const}$) на ділянках з затяжними спусками кількість генерованої електроенергії визначається зміною потенційної енергії поїзда і дорівнює

$$W_{\text{рек}} = 2,725Q(i_{\text{екв}} - w_0)S\eta_{\text{рек}}. \quad (3)$$

В якості кількісного показника ефективності рекуперації енергії може розглядатися величина коефіцієнта рекуперації [6] за час електроспоживання (рекуперації) T , що є відношенням генерованої енергії при електричному гальмуванні $W_{\text{рек}}$ до витрати енергії на тягу $W_{\text{тяг}}$ (з урахуванням витрат на власні потреби поїзда) на конк-

ретній ділянці, в режимі руху тощо, який може бути визначений як

$$k_{\text{рек}} = \frac{W_{\text{рек}}}{W_{\text{тяг}}} = \frac{\sum_{i=1}^n \int_{t_{\text{пi}}}^{t_{\text{кi}}} U_c(t) I_{\text{рек}}(t) dt}{T \int_0^T U_c(t) I_{\text{тяг}}(t) dt}, \quad (4)$$

де $U_c(t)$ – напруга на струмоприймачі транспортного засобу; $I_{\text{рек}}(t)$, $I_{\text{тяг}}(t)$ – відповідно струм в режимі рекуперації і тяги; $t_{\text{пi}}$, $t_{\text{кi}}$ – відповідно моменти початку та закінчення рекуперативного гальмування; n – кількість актів рекуперативного гальмування.

При використанні режимів рекуперативного гальмування в вантажному та пасажирському русі поїздів, де рекуперація використовується переважно для обмеження швидкості руху на ділянках зі спусками, потенціал енергозбереження, за різними оцінками фахівців [1], може сягати 12...15% від витрат на тягу.

При використанні даних режимів на транспорті з циклічними режимами руху (приміські електропоїзда, міський електротранспорт, метрополітен), рівень відновлення витраченої на тягу енергії є значно більшим, і може сягати 40...45%. Так, наприклад дослідження резервів зниження електроспоживання на тягу за рахунок використання на електропоїздах рекуперативного гальмування для умов Київського метрополітену, що проведені в [7] дали змогу визначити максимальні значення енергії рекуперації при гальмуванні. Встановлено, що на помірно прямих ділянках повернення енергії в мережу може сягати 60% від витраченої енергії на тягу, а на ділянках зі спусками повернення може в 2...3 рази перевищувати спожиту на розгін поїзда енергію, що в середньому по мережі дає зниження тягового електроспоживання на 40...44%.

В [8] на базі експериментальних досліджень встановлено, що в умовах Дніпропетровського метрополітену існує значний резерв енергозбереження при рекуперації енергії, який становить відповідно 14...34% в прямому (на підйомі 8‰) і 38...52% у зворотному (на відповідному спуску) напрямках, тобто в середньому складає 26...43% від електроспоживання на тягу. На сьогодні цей резерв не може бути реалізований у зв'язку з відсутністю на експлуатованому парку рухомого складу систем рекуперації та технічних засобів ефективного зберігання (розподілу) рекуперативної енергії при малих розмі-

рах руху поїздів (1-2,5 пар поїздів) в метрополітені.

Тому на етапі розробки відповідних енергозберігаючих заходів системи електротранспорту потребують попередньої оцінки можливого потенціалу енергозбереження, що вимагає розробки відповідних наукових підходів.

Основний матеріал

Теоретичний потенціал енергозбереження від застосування рекуперації в системі електричної тяги може бути визначений шляхом виконання тягових розрахунків з розв'язанням гальмівної задачі, де при відомих параметрах ділянок, режимах руху, швидкості початку гальмування і маси поїздів за виразом (1) визначається максимальна енергія рекуперації $W_{\text{рек}}$, яка буде різною для різних ділянок і експлуатаційних факторів (розмірів руху на ділянках, тощо). Таким чином величина (1) є в абсолютних одиницях теоретичним потенціалом енергозбереження при використанні рекуперації енергії

$$P^{\text{теор}} = W_{\text{рек}}. \quad (5)$$

У відносних одиницях це буде теоретичний коефіцієнт рекуперації $k_{\text{рек}}^{\text{теор}}$.

Величина $k_{\text{рек}}^{\text{теор}}$ залежно від експлуатаційних показників для ділянок зі шкідливими спусками може бути виражена як [9]

$$k_{\text{рек}}^{\text{теор}} = \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} \frac{i - (w_0 + w_{\text{кр}})}{i + w_0 + w_{\text{кр}}} \eta_{\text{сер}} \eta_{\text{рек}} \gamma_{\text{рек}}, \quad (6)$$

де Γ_1 , Γ_2 – річні вантажопотоки відповідно в бік підйому і спуску, млн т/рік; $\gamma_{\text{рек}}$ – частка гальмівної сили рекуперації в загальній гальмівній силі поїзда при додатковому пригальмуванні механічними гальмами.

Для середньо-експлуатаційних умов маємо $w_0 + w_{\text{кр}} \approx 4$ Н/кН, $\eta_{\text{сер}} \approx 0,88$, $\eta_{\text{рек}} \approx 0,87$ [9], тоді вираз (6) прийме вигляд

$$k_{\text{рек}}^{\text{теор}} = 0,65 \frac{\Gamma_2}{\Gamma_1} \frac{i - 4}{i + 4} \gamma_{\text{рек}}. \quad (7)$$

В умовах експлуатації рекуперація на гірських ділянках дозволяє скоротити витрату електроенергії на 10...20 % ($k_{\text{рек}}^{\text{теор}} \approx 0,1...0,2$), що особливо відчутно, якщо спуск розташований у вантажонапруженому напрямку (при $\Gamma_2 > \Gamma_1$).

Енергетичну ефективність рекуперації у циклічних видах руху на ділянках з легким і середнім профілем, де гальмування використовується переважно для зупинок доцільно охарактеризувати величиною $k_{рек}$, що визначається у вигляді відношення кількості енергії, що повертається при рекуперації до втрат енергії в гальмах при відсутності рекуперації

$$k_{рек}^{теор} = \left(1 - \frac{v_k^2}{v_{п}^2}\right) \eta_{сер} \eta_{рек} \quad (8)$$

Для ЕРС з колекторним електроприводом і релейно-контакторною системою управління можна вважати $v_k = (0, 4 \dots 0, 6) v_{п}$ [9], $\eta_{сер} \eta_{рек} = 0, 65$, тоді отримаємо

$$k_{рек}^{теор} = 0, 2 \dots 0, 25 \quad (9)$$

Оскільки втрати в гальмах ЕРС циклічного руху сягають 40...60 % від витраченої електроенергії, то застосовуючи рекуперацію в таких видах тяги в мережу можна регенерувати значну частку витраченої енергії. Для сучасного ЕРС циклічного руху з плавним регулюванням повернення енергії на сьогодні може досягати 30...40 %, за рахунок рекуперації в мережу практично до зупинки (до швидкості 5 км/год) та більш високих значень експлуатаційних ККД [1].

Найважливішим етапом вирішення задачі вибору енергозберігаючих заходів окрім знання теоретичного потенціалу є визначення технічного потенціалу енергозбереження, який можна знаходити як для окремого i -го енергозберігаючого заходу в k -му ($k = k \in K$) елементі (об'єкті) розглядуваної системи, так і для різних множин таких заходів i , $i \in I$ [10].

Цей потенціал може розраховуватися як в абсолютному вираженні, так і у відносних одиницях

$$\Pi_{KI}^{тех} = \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i} \quad (10)$$

$$\Pi_{KI}^{тех} = \frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B - W_{k_i}^P) T_{k_i}}{\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} (W_{k_i}^B T_{k_i})} \quad (11)$$

де $\Pi_{KI}^{тех}$, $\Pi_{KI}^{тех}$ – відповідно абсолютний і відносний потенціали енергозбереження; $W_{k_i}^B$, $W_{k_i}^P$ – витрата електроенергії на тягу відповідно до і після реалізації енергозберігаючих заходів в

умовних одиницях вимірювання; T_{k_i} – період часу, для якого розраховується зниження витрат енергії при відповідному енергозберігаючому заході.

При використанні виразів (10) і (11) для k -го елементу системи може розглядатися тільки один енергозберігаючий захід з кожної альтернативної множини.

В умовах реальної експлуатації на реалізацію теоретичного потенціалу (1) опосередковано впливає ряд випадкових факторів, що не входять до (1). Найчастіше при рекуперативному гальмуванні транспортних засобів реалізується енергія

$$W'_{рек} < W_{рек} \quad (12)$$

а її нереалізована частина є надлишковою енергією, яка дорівнює

$$\Delta W_{рек} = W_{рек} - W'_{рек} \quad (13)$$

При відсутності на ТП НЕ, ІА, або РН вона утилізується в гальмівних пристроях поїздів, що знижує ефективність системи електричної тяги.

Наявність складової $\Delta W_{рек}$ пов'язана з розкидом в часі процесів споживання і генерації енергії транспортних засобів, що знаходяться одночасно на ділянках в тягових і рекуперативних режимах. Енергія $\Delta W_{рек}$ особливо виражена при зниженні розмірів руху на ділянках, та в різних видах транспорту може сягати 30...100 % від власне величини (1) [5].

Отже енергія рекуперації що реалізується в реальних умовах експлуатації згідно (12) є технічно реалізованим потенціалом енергозбереження, що дорівнює

$$\Pi^{тех} = W'_{рек} = W_{рек} k_{вик} \quad (14)$$

де $k_{вик}$ – коефіцієнт використання енергії рекуперації (іншими транспортними засобами, що знаходяться в тягових режимах).

Величина $k_{вик}$ при відсутності НЕ, ІА, РН на ТП належить діапазону 0...1, залежить переважно від поїзної ситуації на ділянці, напруги на шинах ближньої ТП і режимів електроспоживання поїздів в зоні рекуперації та значною мірою являє собою випадкову величину. Залежно від напруги на струмоприймачі рекуперуючого транспортного засобу $U_c(t)$ величина $k_{вик}$ може бути виражена як

$$k_{\text{вик}}(U_c(t)) = \begin{cases} 1, & \text{при } U_c(t) < U_T^{\text{max}}, I_{\text{тяг}}(t) \geq I_{\text{рек}}(t), \\ 0, & \text{при } U_c(t) \geq U_T^{\text{max}}, I_{\text{тяг}}(t) = 0. \end{cases}$$

де U_c^{max} – гранично допустима напруга на струмоприймачі і в контактній мережі [11, 12]; $I_{\text{рек}}(t)$, $I_{\text{тяг}}(t)$ – відповідно струм рекуперації і тяги в зоні рекуперації.

Проміжні значення величини $k_{\text{вик}}$ в зазначеному діапазоні відповідають випадку з обмеженим тяговим електроспоживанням в зоні рекуперації, коли

$$I_{\text{тяг}}(t) < I_{\text{рек}}(t),$$

при цьому має місце надлишковий струм рекуперації

$$\Delta I_{\text{рек}}(t) = I_{\text{рек}}(t) - I_{\text{тяг}}(t),$$

якому відповідає надлишкова (нереалізована) енергія рекуперації

$$\Delta W_{\text{рек}} = \Pi^{\text{теор}} - \Pi^{\text{тех}} = \Pi^{\text{теор}}(1 - k_{\text{вик}}). \quad (15)$$

При відсутності інтелектуальних принципів управління електроспоживанням поїздів регулювання лише їх положень шляхом оптимізації графіка руху поїздів (ГРП) на ділянці не може гарантовано забезпечити в зоні рекуперації одночасного збігу процесів рекуперації та електроспоживання поїздів. У такому випадку навіть при наявності систем рекуперації на всьому парку ЕРС показник відновлення енергії при існуючих розмірах і режимах руху поїздів не може перевищувати 10...20 % від значення (1).

Необхідно зазначити, що оцінка енергетичної ефективності рекуперації в різних видах руху істотно залежить від величини $k_{\text{вик}}$. Дана величина визначає ефективність споживання енергії рекуперації в СТЕ і власне формує енергозберігаючий ефект від використання режимів відновлення енергії в системах електрифікованого транспорту. Дана величина залежить від багатьох як детермінованих факторів, таких як наявність приймачів енергії $\Delta W_{\text{рек}}$, так і невизначених факторів, таких як поїзна ситуація на ділянках, миттєве тягове електроспоживання в зоні рекуперації, напруга на ввіді ТП та ін., тому для різних ділянок і ситуацій є імовірнісною. Коефіцієнт використання енергії рекуперації в СТЕ є динамічною величиною, і представляє собою

складну функцію багатьох змінних, основні з яких це

$$k_{\text{вик}} = f(U_{\text{ТП}}(t), N(t), P_{\text{тяг}}(t), L_{\text{рек}}(t), U_{\text{вх}}(t)), \quad (16)$$

де $U_{\text{ТП}}(t)$ – напруга на шинах граничних ТП; $N(t)$ – кількість поїздів на МПЗ у режимі тяги; $P_{\text{тяг}}(t)$ – тягове електроспоживання в зоні рекуперації; $L_{\text{рек}}(t)$ – відстань між поїздами в режимі рекуперації і тяги; $U_{\text{вх}}(t)$ – напруга на ввіді ТП.

Треба зазначити, що навіть за умови обладнання ТП постійного струму ІА на таких ділянках не може гарантовано забезпечуватися $k_{\text{вик}} = 100\%$, оскільки здатність системи зовнішнього електропостачання до прийому енергії $\Delta W_{\text{рек}}$ в значній мірі залежить від її поточного завантаження нетяговими споживачами у вузлах приєднання ТП. Оскільки енергосистема країни на сьогодні є недовантаженою і напруги на приєднаннях ТП (35, 110, 220 кВ) переважно тримаються на верхній межі, а часто перевищують її [13], то ефективність і власне можливість споживання надлишкової енергії рекуперації системою зовнішнього електропостачання може бути обмеженою.

На практиці важливе значення має визначення економічно доцільного потенціалу енергозбереження та формування на цій основі планів його реалізації. Граничною умовою економічної доцільності реалізації енергозберігаючого заходу є, як мінімум, рівність додаткових витрат (інвестиційних, експлуатаційних та ін.) за життєвий цикл, пов'язаних з реалізацією такого заходу Z_{ki} і сумарної вартості зекономлених енергоресурсів за життєвий цикл його реалізації, що формалізується в такому вигляді:

$$\Pi_{KI}^{\text{ек}} = \sum_{t=1}^T \left(Z_{ki} - \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} C_t \cdot \Delta O_{kit} \right) \geq 0, \quad (17)$$

де $\Pi_{KI}^{\text{ек}}$ – економічно доцільний потенціал енергозбереження; t – розрахунковий етап у періоді життєвого циклу; C_t – вартість електроенергії; ΔO_{kit} – обсяг зекономленої електроенергії.

Необхідно зазначити, що технічний і економічно доцільний потенціал може змінюватися з часом, під впливом науково-технічного прогресу та економічної кон'юнктури. Однак

зміни під впливом цих факторів, як правило, відбуваються протягом досить тривалого періоду.

У загальному вигляді процес оцінки потенціалу енергозбереження для систем електричного транспорту включає наступні етапи:

а) формулювання цілей оцінки потенціалу енергозбереження;

б) визначення переліку об'єктів і відповідних енергозберігаючих заходів (множини K і L);

в) розробка алгоритмів оцінки потенціалу енергозбереження, який би відображав специфіку об'єкта та енергозберігаючого заходу;

г) збір необхідної інформації для реалізації відповідних алгоритмів;

д) розрахунок потенціалу енергозбереження.

З урахуванням специфіки розв'язуваної задачі, показник потенціалу енергозбереження ідентифікується набором класифікаційних ознак, причому деякі з них прямо залежать від особливостей досліджуваної системи.

При вирішенні практичних завдань по визначенню пріоритетів реалізації потенціалу енергозбереження та формування відповідних планів необхідно враховувати наявність обмежень, насамперед інвестиційних. Це пов'язано з тим, що не завжди виявляється можливою реалізація заходів з найбільшим технічно досяжним потенціалом енергозбереження.

Тому, для вирішення таких завдань необхідно застосування оптимізаційних моделей, які у спрощеній постановці формалізуються в наступному вигляді:

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N_k} b_{kin} \cdot \Pi_{kin}^{ek} \rightarrow \max, \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} \sum_{n \in N_k} b_{kin} = 1, \quad (19)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I} Z_{ki} \leq Z^{\text{sum}}, \quad (20)$$

де n – індекс множини альтернативних енергозберігаючих заходів; b_{kin} – булева змінна; Z^{sum} – загальний обсяг коштів на реалізацію енергозберігаючих заходів.

При освоєнні потенціалу енергозбереження при рекуперативній енергії в першу чергу доцільно реалізовувати організаційно-технологічні енергозберігаючі заходи, які не вимагають значних витрат. Одним із них є реалізація технічно доступного потенціалу зниження витрат для систем електропостачан-

ня тяги поїздів на постійному струмі за рахунок узгодженої оптимізації графіка руху поїздів і їх схем електроживлення.

Особливістю цього потенціалу є те, що він залежить від рівня втрат при фактичному стані системи енергозабезпечення і при оптимальній схемі дорівнює

$$\Pi_{KI}^{ek} = F(k_i, N^{\text{opt}}) - F(k_i, N^{\text{fact}}), \quad (21)$$

де k_i – коефіцієнт інтенсивності руху поїздів, що визначає завантаження обладнання підстанцій, нерівномірність навантаження та ін.; $N^{\text{opt}}, N^{\text{fact}}$ – відповідно оптимальна та фактична схеми електропостачання.

Таким чином, цей потенціал може істотно змінюватися з часом (є динамічним), що обумовлено його специфікою. Поряд з цим, специфічним для централізованих систем електропостачання є наявність системного ефекту від зниження витрат на нижчих класах напруги, оскільки це викликає додаткове зниження витрат на більш високих класах напруги в живильних лініях електропередачі і трансформаторах [14]. Величина цього додаткового ефекту буде визначатися характеристиками елементів, що входять в систему електропостачання, а також всіма наявними між ними зв'язками. При цьому потенціал енергозбереження системи електропостачання являє собою сукупність потенціалів енергозбереження вхідних у нього елементів і може бути розрахований як сума значень потенціалів окремих елементів.

Отже визначення технічного потенціалу енергозбереження при рекуперативній енергії може бути зведено до визначення залежності коефіцієнта використання енергії рекуперативної (16) від відповідних чинників. Дані залежності можуть бути визначені або експериментально, що представляють значні труднощі, або в результаті моделювання роботи СТЕ при заданих експлуатаційних показниках роботи конкретної ділянки. При цьому можуть бути отримані діапазони даної величини при врахуванні можливостей СТЕ щодо накопичення енергії $\Delta W_{\text{рек}}$, її інвертування та передачі до живильної мережі, або передачі до віддалених тягових навантажень на суміжних міжпідстанційних зонах шляхом плавного пониження напруги на виходах ТП.

В табл. 1 наведено основні статистичні характеристики технічно реалізованої величини $k_{\text{вик}}^{\text{тех}}$ при впровадженні різних підходів до

підвищення ефективності використання енергії рекуперації.

Таблиця 1

Основні статистичні характеристики коефіцієнта $k_{\text{вик}}^{\text{тех}}$

№ п/п	Енергозберігаюча технологія	$k_{\text{вик}}^{\text{тех}}$			
		$k_{\text{вик}}^{\text{min}}$	$k_{\text{вик}}^{\text{max}}$	$m_{k_{\text{вик}}}$	$\sigma_{k_{\text{вик}}}$
1	Оптимізація ГРП	0,4	0,5	0,47	0,11
2	Використання ІА на ТП	0,7	0,85	0,73	0,85
3	Використання НЕ на ТП	0,7	0,75	0,71	0,12
4	Використання РН на ТП	0,6	0,7	1,68	0,09

Данні значення отримані на основі розрахунків струмозподілу енергії рекуперації в СТЕ при наявності ІА, НЕ та РН на ТП [2], а також при оптимізації ГРП за критерієм споживання енергії рекуперації [15].

Для визначення раціональних економічно-обґрунтованих енергозберігаючих заходів для підвищення ефективності використання енергії рекуперації в транспортних системах необхідно

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Д: Изд-во Маковецкий, 2011. – 456 с.
2. Быков Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование / Е. И. Быков. – М.: Транспорт, 1983. – 447 с.
3. Щербак, Я. В. Аналіз застосування рекуперативного гальмування на залізницях України / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. - № 2. – С. 30-34.
4. Сергієнко, М. І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати / М. І. Сергієнко // Локомотив-інформ. – 2010. - № 4. – С. 24-26.
5. Сопов, В. И. Способы повышения эффективности использования энергии электрического торможения подвижного состава [Электронный ресурс] / В. И. Сопов // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. – Режим доступа: [URL:http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43](http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43).
6. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9-13.
7. Сулим, А. А. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена [Текст] : матер. X межд. науч.-тех. конф. / А. А. Сулим, С. Д. Сичев, В. Р. Распопин

враховувати динамічні режими тягового електропоживання, режими зовнішнього електропостачання, що містять значну випадкову складову, тому це вимагає побудови складних динамічних, в більшій ступені нечітких моделей, що є наступною задачею авторів.

Висновки

Запропоновано визначити потенціал енергозбереження в системах електрифікованого транспорту при рекуперації залежно від коефіцієнта використання енергії рекуперації $k_{\text{вик}}$ та отримано його залежності величини від експлуатаційних факторів.

Визначено діапазон можливих значень технічно реалізованої величини $k_{\text{вик}}^{\text{тех}}$ при потенційній реалізації різних енергозберігаючих заходів з підвищення ефективності споживання енергії рекуперації в системах електрифікованого транспорту.

Данні результати є основою для вибору економічно доцільних заходів з підвищення ефективності використання енергії рекуперації, що дозволять мінімізувати вартісні показники енергозберігаючих заходів.

REFERENCES

1. Getman, G. K. Teoriya elektricheskoy tyagi [Tekst] / G. K. Getman. – D: Izd-vo Makovetskiy, 2011. – 456 s.
2. Byikov E. I. Elektrosnabzhenie metropolitenov. Ustroystvo, ekspluatatsiya i proektirovanie / E. I. Byikov. – M.: Transport, 1983. – 447 s.
3. Scherbak, Ya. V. Anallz zastosuvannya rekupe-rativnogo galmuvannya na zallznitsyah UkraYini / Ya. V. Scherbak, V. P. Nerubatskiy // Zallznichniy trans-port UkraYini. – 2011. - № 2. – S. 30-34.
4. SergIEnko, M. I. Osnovni napryamki roboti UkrzallnitsI z energoberezhennya ta YiYi rezultati / M. I. SergIEnko // Lokomotiv-inform. – 2010. - № 4. – S. 24-26.
5. Sopov, V. I. Sposobyi povysheniya effektivnos-ti ispolzovaniya energii elektricheskogo tormozheniya podvizhnogo sostava [Elektronnyy re-surs] / V. I. Sopov // Onlayn Elektrik: Elektro-energetika. Novyye tehnologii, 2012. – Rezhim do-stupa: [URL:http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43](http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43).
6. Sablin, O. I. Doslidzhennya effektivnosti pro-tsesu rekupe-ratsiyi elektroenergiyi v umovah metropoli-tenu / O. I. Sablin // Vostochno-evropeyskiy zhurnal peredoviyh tehnologiy. – 2014. – № 6/8 (72). – S. 9-13.
7. Sulim, A. A. Ekonomiya elektroenergiyi pri ispolzovanii rekupe-rativnogo tormozheniya na vagonah metropolitena [Tekst] : mater. H mezh-d. nauch.-teh. konf. / A. A. Sulim, S. D. Sichev, V. R. Raspopin // Elektromehani-cheskie i energeticheskie sistemy,

// Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации. – КНУ им. М. Остроградского, 2012. – С. 344.

8. Кузнецов В.Г., Саблин О.И., Губский П.В., Колыхаев Е.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена [Текст] / В.Г. Кузнецов, О.И. Саблин, П.В. Губский, Е.Г. Колыхаев // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2015. – № 95. – С. 81-89.

9. Теория электрической тяги / Розенфельд В. Е., Исаев И. П., Сидоров Н. Н., Озеров М. И. – Москва: Транспорт, 1995. – 328 с.

10. Кузнецов В. Г., Костюковский Б. А. Оценка потенциала энергосбережения систем тягового электроснабжения постоянного тока / В. Г. Кузнецов, Б. А. Костюковский // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2012. – № 26. – С. 109-116.

11. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75 – [Действует с 1977-01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 3 с.

12. Напряжение питания тяговых железнодорожных сетей: Стандарт NF EN 50163-1996 – [Действует с 01.11.1996]. МКС 29.280, 1995. – 11 с.

13. Саблін, О. І. Ефективність рекуперації електроенергії в системі електротранспорту з інверторними тяговими підстанціями постійного струму / О. І. Саблін, Д. О. Босій, В. Г. Кузнецов та ін. // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2016. – № 2. – С. 73-79.

14. Yunhe H. Modeling of electricity prices / H. Yunhe, H. Yang // Green Circuits and Systems (ICGCS), 2010 Intern. Conf. on. – 21-6-2010. – P. 549-554.

15. Кузнецов В. Г., Калашников К.А. Разработка научных принципов уменьшения потерь электроэнергии в тяговой сети постоянного тока путем регулирования транспортного потока / В. Г. Кузнецов, К.А. Калашников // Электрификация транспорта. – 2014. – № 8. – С. 104-109.

metodyi modelirovaniya i optimizatsii. – KNU im. M. Ostrogradskogo, 2012. – S. 344.

8. Kuznetsov V.G., Sablin O.I., Gubskiy P.V., Kolyihaev E.G. Analiz rezervov energosberezheniya pri vnedrenii sistemyi rekuperatsii energii na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitena [Tekst] / V.G. Kuznetsov, O.I. Sablin, P.V. Gubskiy, E.G. Kolyihaev // Glrnicha elektromehanika ta avtomatika. – 2015. – № 95. – S. 81-89.

9. Teoriya elektricheskoy tyagi / Rozenfeld V. E., Isaev I. P., Sidorov N. N., Ozerov M. I. – Moskva: Transport, 1995. – 328 s.

10. Kuznetsov V. G., Kostyukovskiy B. A. Otsenka potentsiala energosberezheniya sistem tyagovogo elektrosnabzheniya postoyannogo toka / V. G. Kuznetsov, B. A. Kostyukovskiy // Vestnik Natsionalnogo tehniceskogo universiteta «HPI». – 2012. – № 26. – S. 109-116.

11. Transport elektrifitsirovannyiy s pitaniem ot kontaktnoy seti. Ryad napryazheniy: GOST 6962-75 – [Deystvuet s 1977-01-01] – M.: Izd-vo standartov, 1976. – 3 s.

12. Napryazhenie pitaniya tyagovyih zheleznodorozhnyih setey: Standart NF EN 50163-1996 – [Deystvuet s 01.11.1996]. MKS 29.280, 1995. – 11 s.

13. Sablin, O. I. Efekty`vnist` rekuperaciyi elektroenergiyi v sy`stemi elektrottransportu z invertornym` tyagovym` pidstanciyamy` postijnogo strumu / O. I. Sablin, D. O. Bosy`j, V. G. Kuznecov ta in. // Visny`k Vinny`cz`kogo politexnichnogo insty`tutu. – 2016. – № 2. – S. 73-79.

14. Yunhe H. Modeling of electricity prices / H. Yunhe, H. Yang // Green Circuits and Systems (ICGCS), 2010 Intern. Conf. on. – 21-6-2010. – P. 549-554.

15. Kuznetsov V. G., Kalashnikov K.A. Razrabotka nauchnyih printsipov umensheniya poter elektroenergii v tyagovoy seti postoyannogo toka putem regulirovaniya transportnogo potoka / V. G. Kuznetsov, K.A. Kalashnikov // Elektrifikatsiya transporta. – 2014. – № 8. – S. 104-109.

Надійшла до друку 02.12.2016.

Внутрішній рецензент *Афанасов А. М.*

Зовнішній рецензент *Денисюк С. П.*

У зв'язку із розкидом в часі процесів споживання і генерації енергії різними транспортними засобами, що знаходяться на ділянці в тягових і рекуперативних режимах, показник відновлення енергії при існуючих системах енергозабезпечення транспорту на сьогодні є незначним. Перспектива вдосконалення систем енергозабезпечення електрифікованого транспорту для підвищення ефективності використання енергії рекуперації, а саме впровадження накопичувачів енергії на тягових підстанціях, інверторних агрегатів та регуляторів напруги на шинах тягових підстанцій потребує розвитку підходів щодо визначення технічного та економічно доцільного потенціалу енергозбереження при рекуперації для існуючих і перспективних систем транспорту. Це дозволить обирати науково обґрунтовані технології та енергозберігаюче обладнання з мінімальними вартісними показниками та надлишковою потужністю в залежності від експлуатаційних показників ділянок.

Ключові слова: рекуперація енергії; потенціал енергозбереження; тягове електроспоживання; надлишкова потужність; тягове та зовнішнє електропостачання; коефіцієнт використання.

УДК 621.331.3

В. Г. КУЗНЕЦОВ (ДНУЖТ), О. И. САБЛИН (ДНУЖТ)

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, кафедра интеллектуальных систем электроснабжения, 49010, г. Днепр, ул. Лазаряна, 2, тел. (056) 793-19-11, эл. почта: vkuz@i.ua, olegsss@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0003-4165-1056, orcid.org/0000-0001-6784-648X

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ РЕКУПЕРАЦИИ

В связи с разбросом во времени процессов потребления и генерации энергии различными транспортными средствами, находящимися на участке в тяговых и рекуперативных режимах, показатель возобновления энергии при существующих системах энергообеспечения транспорта на сегодня является незначительным. Перспектива совершенствования систем энергообеспечения электрифицированного транспорта для повышения эффективности использования энергии рекуперации, а именно внедрение накопителей энергии на тяговых подстанциях, инверторных агрегатов и регуляторов напряжения на шинах тяговых подстанций требует развития подходов относительно определения технического и экономически целесообразного потенциала энергосбережения при рекуперации для существующих и перспективных систем транспорта. Это позволит выбирать научно обоснованные технологии и энергосберегающее оборудование с минимальными стоимостными показателями и избыточной мощностью в зависимости от эксплуатационных показателей участков.

Ключевые слова: рекуперация энергии; потенциал энергосбережения; тяговое электропотребление; избыточная мощность; тяговое и внешнее электроснабжение; коэффициент использования.

Внутренний рецензент *Афанасов А. М.*

Внешний рецензент *Денисюк С. П.*

UDC 621.331.3

V. G. KUZNETSOV (DNURT), O. I. SABLIN (DNURT)

Dnipropetrovsk national University of railway transport named after academician V. Lazaryan, Department of intelligent power supply systems, 49010, Dnipro, Lazaryan str., 2, tel (056) 793-19-11, al. email: vkuz@i.ua, olegsss@i.ua, ORCID: orcid.org/0000-0003-4165-1056, orcid.org/0000-0001-6784-648X

DETERMINATION OF POTENTIAL ENERGY SAVINGS IN SYSTEMS OF ELECTRIC TRANSPORT IN THE TASK OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF ENERGY CONSUMPTION RECOVERY

In connection with the variation in time of the consumption and generation of energy by various means of transport, located on a plot of the traction and regenerative modes, the rate of renewal of energy in existing energy supply systems transport today is insignificant. The prospect of improving power supply systems of electric transport to improve the efficiency of use of energy recovery, namely the introduction of energy storage devices in traction substations, of inverter units and voltage regulators on the busbars of traction substations requires the development of approaches regarding the definition of the technical and economically feasible potential of energy saving in energy recovery for existing and future transport systems. This will allow you to select scientifically sound technologies and energy-efficient equipment with minimal cost indicators and excess capacity depending on the operational parameters of the sites.

Keywords: energy recovery; the potential energy savings; traction power consumption; surplus power; traction and power supply.

Internal reviewer *Afanasov A. M.*

External reviewer *Denisyuk S. P.*