

4. Гапон, Д. А. Завадостійкий метод вимірювання промислової частоти і швидкості її зміни [Текст] : матер. XX міжн. наук.-прак. конф. / Д. А. Гапон // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Ч. II. – Харків : НТУ «ХПІ», 2012. – С. 206.
5. Folea, S. Power quality measurement system using FPGAs [Text] / S. Folea, G. Mois, L. Miclea // 2012 13th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012. – P. 1280–1285. doi: 10.1109/optim.2012.6231855.
6. Chanxia, Zhu. Design and realization of regional power quality monitoring system [Text] / Zhu Chanxia, Hu Minqiang, Wu Zaijun, Dou Xiaobo, Zhao Shanglin // 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. – P. 2023–2027. doi: 10.1109/drpt.2008.4523740.
7. Li, P. Power Quality Monitoring of Power System Based on Spectrum Analysis [Text] / P. Li, L. Zhao, H. Bai, Y. Zhang // 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, 2010. – P. 1–4. doi: 10.1109/iceee.2010.5661359.
8. Siahkali, H. Power quality indexes for continue and discrete disturbances in a distribution area [Text] / H. Siahkali // 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, 2008. – P. 678–683. doi: 10.1109/pecon.2008.4762561.
9. Rendroyoko, I. Development of power quality control procedures and standards to control the connection of non-linear loads in electric power systems [Text] / I. Rendroyoko, M. Rusli // 22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), 2013. – P. 1–6. doi: 10.1049/cp.2013.0621.
10. Abdullah, A. R. A new vector draft method for harmonic source detection at point of common coupling [Text] / A. R. Abdullah, G. Z. Peng, S. A. Ghani, M. H. Jopri // 2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2014. – P. 110–114. doi: 10.1109/peoco.2014.6814409.
11. Chung, I.-Y. Development of power quality diagnosis system for power quality improvement [Text] / I.-Y. Chung, D.-J. Won, J.-M. Kim, S.-J. Ahn, S.-I. Moon, J.-C. Seo, J.-W. // 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491). doi: 10.1109/pes.2003.1270509.

В роботі виконано експериментальне дослідження параметрів енергії гальмування електропоїздів в умовах Дніпропетровського метрополітену (Україна). Встановлено, що в режимі реостатного гальмування утилізується 15...50 % енергії, витраченої на тягу поїздів. Запропоновано та оцінено якісні показники ефективності енергії рекуперації, що необхідно враховувати при виборі раціонального заходу з підвищення ефективності використання енергії гальмування електропоїздів

Ключові слова: метрополітен, електроспоживання, електричне гальмування, рекуперація, електроенергія, надлишкова, показники ефективності, енергозбереження

В работе выполнено экспериментальное исследование параметров энергии торможения электропоездов в условиях Днепропетровского метрополитена (Украина). Установлено, что в режиме реостатного торможения утилизируется 15...50 % энергии, затраченной на тягу поездов. Предложены и оценены качественные показатели эффективности рекуперации энергии, что необходимо учитывать при выборе рационального мероприятия по повышению эффективности использования энергии торможения электропоездов

Ключевые слова: метрополитен, электропотребление, электрическое торможение, рекуперация, электроэнергия, избыточная, показатели эффективности, энергосбережение

УДК 629.423.1

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30483

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В УМОВАХ МЕТРОПОЛІТЕНУ

О. І. Саблін

Кандидат технічних наук, доцент
Кафедра електропостачання залізниць
Дніпропетровський національний
університет залізничного транспорту
ім. ак. В. Лазаряна
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпропетровськ,
Україна, 49010
E-mail: olegsss@i.ua

1. Вступ

В метрополітенах України середня відстань між станціями становить близько 0,9...1,5 км, тому режими руху електропоїздів пов'язані з періодичними прискореннями і гальмуваннями між зупинками. Данні режими руху, навіть при середній швидкості початку

гальмування ~ 40 км/год є сприятливими для рекуперації електроенергії, що дозволяє суттєво зменшити енергоємність метрополітенів. При відсутності на рухомому складі системи рекуперативного гальмування 30...45 % витрат енергії на тягу втрачається шляхом утилізації частини кінетичної і потенціальної енергії поїзда перед зупинкою в гальмівних пристроях [1].

Враховуючи, що енергоємність перевізного процесу в метрополітенах сьогодні складає близько 80...90 % від загального енергоспоживання галузі, аналіз ефективності процесу рекуперації і факторів що впливають на нього є актуальним напрямом досліджень.

2. Огляд літератури і постановка проблеми

Особливістю метрополітенів є велика нерівномірність тягового електроспоживання і можливість відновлення значної частини витраченої на тягу енергії шляхом її рекуперації при гальмуваннях перед зупинками. Зважаючи на короткі відстані між зупинками у електропоїздів метрополітену практично відсутні усталені режими електроспоживання, а тривалості окремих режимів руху поїздів (тяга, вибіг, гальмування) і діапазон зміни потужностей в режимах тяги і рекуперації являють собою випадкові величини.

Для здійснення корисної роботи по переміщенню за час T вагонами електропоїзда з контактної мережі споживається електроенергія

$$A = m \int_0^T U(t)I(t)dt, \quad (1)$$

де $U(t)$ – напруга на струмоприймачі вагона; $I(t)$ – тяговий струм вагона; m – кількість вагонів в електропоїзді.

Рівняння енергетичного балансу за час руху електропоїзда в загальному випадку має вигляд

$$A = A_{\Pi} + A_W + A_T + \Delta A + A_{CH} - A_{PEK}, \quad (2)$$

де A_{Π} – втрати енергії в пускових пристроях електропоїзда; A_W – витрата енергії відповідно на подолання основного опору руху поїзда, опору в кривих і на ухилах; A_T – втрати енергії при гальмуванні і пригальмуванні поїзда; ΔA – втрати енергії в силовому колі та обладнанні поїзда; A_{CH} – витрата енергії на живлення кіл власних потреб поїзда; A_{PEK} – електроенергія рекуперативного гальмування.

На сучасному електротранспорті з плавним регулюванням потужності втрати $A_{\Pi} \approx 0$, а використання режиму рекуперативного гальмування дозволяє практично виключити з енергетичного балансу складову втрат енергії в гальмах електропоїзда A_T , оскільки на такому рухомому складі існує можливість здійснення рекуперативного гальмування майже до зупинки транспортного засобу ($A_{PEK} \rightarrow A_T$).

Кількість електроенергії, яка може бути згенерована електропоїздом при гальмуванні для зупинки, зниження або стабілізації швидкості, визначається зменшенням його кінетичної і потенційної енергій і дорівнює [2]:

$$A_{PEK} = (0,01073(1+\gamma)Q(v_{\Pi}^2 - v_K^2) - 2,725Q(w_0 \pm i_{EKB})S)\eta_{PEK}, \quad (3)$$

де Q – вага поїзда; $(1+\gamma)$ – коефіцієнт інерції обертових мас поїзда; V_{Π} , V_K – швидкість відповідно на початку і в кінці гальмування; w_0 – основний питомий опір руху поїзда при середній швидкості на ділянці гальмування; i_{EKB} – еквівалентний ухил на ділянці гальмування; S – довжина гальмівного шляху; η_{PEK} – ККД електропоїзду в режимі рекуперації.

В умовах реальної експлуатації на величину енергії рекуперації крім параметрів, що входять до (3), суттєво впливає режим напруги на струмоприймачах електропоїзда, що визначається рівнем тягового електроспоживання інших поїздів в зоні рекуперації [3], тому найчастіше при гальмуванні реалізується енергія $A'_{PEK} < A_{PEK}$, а її нереалізована частина $\Delta A_{PEK} = A_{PEK} - A'_{PEK}$ утилізується в гальмівних реостатах. Надлишкова енергія рекуперації ΔA_{PEK} при існуючих розмірах і графіках руху в метрополітенах може сягати 30...100 % [4, 5].

Для розв'язання проблеми надлишкової енергії рекуперації в метрополітенах розроблені принципи її локальної буферизації накопичувачами [6–8], передачі енергії ΔA_{PEK} до системи зовнішнього електропостачання інверторами підстанцій [4], або локалізації в тяговій мережі метрополітену за рахунок розширення зони рекуперації при регулюванні напруги на шинах суміжних тягових підстанцій [9]. Розглянуті підходи мають як свої переваги так і недоліки і вимагають певних капітальних витрат на модернізацію метрополітену.

3. Мета і задачі дослідження

Метою роботи є експериментальне дослідження кількісних і якісних показників процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену, що необхідно враховувати при виборі раціонального заходу з підвищення ефективності використання енергії гальмування електропоїздів.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести вимірювання параметрів електроенергії, що генерується електропоїздами при електричному гальмуванні в умовах реальної експлуатації, обґрунтувати та виконати чисельну оцінку показників ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену.

4. Аналіз заходів з підвищення ефективності використання рекуперації енергії в метрополітенах

В метрополітенах України на даний час перевезення пасажирів забезпечується переважно вагонами з колекторними двигунами, контактним регулюванням потужності і реостатним гальмуванням, що характеризуються великими питомими витратами електроенергії на одиницю перевізної роботи. Відсутність системи рекуперативного гальмування на вагонах призводить до суттєвого збільшення загальної кількості споживаної енергії на тягу метрополітенів за рахунок значних втрат енергії в пуско-гальмівних реостатах, тому існує потреба у закупівлі нових вагонів для метрополітенів України або модернізація існуючих системою рекуперації.

Для повного використання рекуперативної енергії електропоїздами на тягу в системі метрополітену графіки руху електропоїздів повинні передбачати одночасне прибуття і відправлення електропоїздів на всі станції, при яких забезпечується збіг в часі споживання і рекуперації електроенергії. Але при суттєвих різницях відстаней між станціями побудова таких графіків буде вимагати нерівномірної швидкості руху поїздів по перегонах, що призведе до збільшення питомої витрати енергії на рух.

Передача надлишкової рекуперативної енергії з системи тягового електропостачання метрополітену (825 В) до міської електромережі 6 (10) кВ вимагає наявності на тягових підстанціях метрополітенів інверторів електроенергії. Імпульсний короткочасний характер генерації енергії гальмування поїздів до системи зовнішнього електропостачання пов'язаний з рядом негативних впливів на живлення нетягових споживачів, що приєднані в загальному вузлі з тяговими підстанціями метрополітену. Крім того, ефективність реверсу надлишкової рекуперації до системи зовнішнього електропостачання суттєво залежить від графіків її завантаження, та має ще ряд суттєвих недоліків [10]. В такому випадку на перший план виходять питання розробки ефективних методів локалізації надлишкової рекуперативної енергії в енергосистемі метрополітену [6–9].

5. Експериментальне дослідження параметрів генерації енергії електропоїздами метрополітену при електричному гальмуванні

Для оцінки показників ефективності процесу рекуперації енергії в метрополітені на базі КП «Дніпропетровський метрополітен» за допомогою вимірювального комплексу cDAQ-9174 виробництва National Instruments були експериментально виміряні параметри споживання і генерації енергії електропоїздом 81-717(714).5М відповідно в режимах тяги та електричного гальмування. Принципова схема підключення безконтактних роз'ємних давчів напруг і струмів LEM до силового кола вагона наведена на рис. 1.

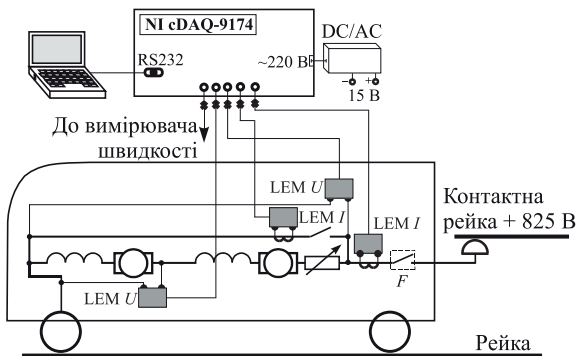


Рис. 1. Принципова схема підключення вимірювальних приладів до силового кола вагона електропоїзда

У зв'язку з тим, що експлуатований парк вагонів Дніпропетровського метрополітену не обладнаний системою рекуперативного гальмування, оцінка показників ефективності рекуперації була виконана за генерованою енергією електропоїздом при реостатом гальмуванні. Для режиму реостатного гальмування на електропоїздах використовується мостова схема з самозбудженням і перехресною схемою живлення обмоток збудження тягових двигунів. Схема приєднання давчів LEM для вимірювання параметрів генерації енергії в режимі реостатного гальмування вагона наведена на рис. 2.

До NI cDAQ-9174

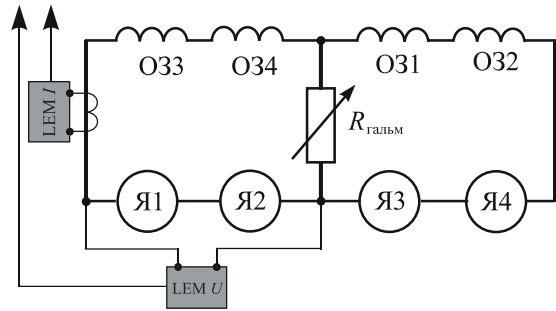


Рис. 2. Схема вимірювання параметрів генерації енергії в колі тягових електродвигунів при реостатному гальмуванні вагону

На рис. 3 представлено одну з реалізацій вимірювання параметрів електроспоживання та генерації електроенергії електропоїздом метрополітену в режимі тяги та електричного гальмування при русі на ділянці Комунарівська-Вокзальна.

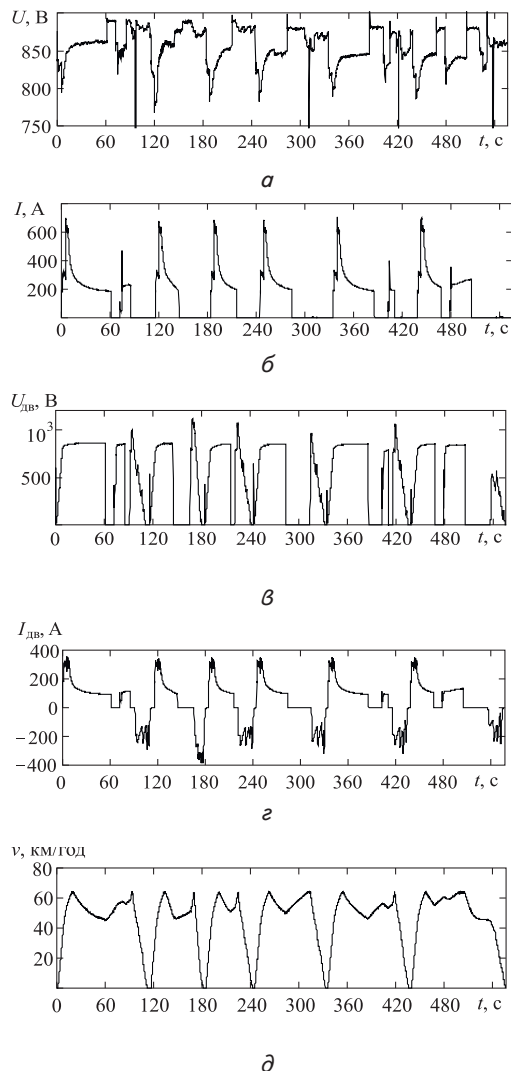


Рис. 3. Параметри режимів електроспоживання, генерації та руху електропоїзда метрополітену:
 а – напруга на струмоприймачі $U(t)$;
 б – споживаний струм вагону $I(t)$; в – напруга на групі двигунів $U_{дв}(t)$; г – струм двигунів $I_{дв}(t)$;
 д – швидкість руху електропоїзда $v(t)$

6. Показники ефективності рекуперації електроенергії

Графіки миттєвої потужності електропоїзду з 3 вагонів в режимі тяги і електричного гальмування визначені за вимірними часовими залежностями відповідно до виразу одна з яких представлена на рис. 4.

$$P(t) = \begin{cases} 3U(t)I(t), & \text{при } P(t) > 0, \\ 6U_{дв}(t)I_{дв}(t), & \text{при } P(t) < 0. \end{cases}$$

За кількісний показник енергії рекуперації прийнята величини коефіцієнта рекуперації, що є відношенням витрати енергії на тягу (з урахуванням витрат на власні потреби поїзда) до генерованої енергії при електричному гальмуванні

$$k_{рек} = \frac{\int_0^T U(t)I(t)dt}{2 \int_0^T U_{дв}(t)I_{дв}(t)dt}$$

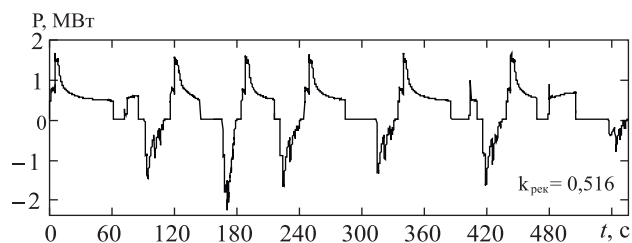


Рис. 4. Реалізація миттєвої потужності електропоїзда метрополітену (рекуперація енергії при P<0)

В результаті дослідних поїздок встановлено що в Дніпропетровському метрополітені існує значний резерв енергозбереження при використанні енергії гальмування поїздів, що складає 14,4...51,6 % від витрат електроенергії на тягу.

Електричне гальмування в метрополітені використовується переважно з метою зупинного гальмування, а електроенергія, що при цьому генерується, має короткочасний імпульсний характер зі спадаючою потужністю (рис. 4). В такому разі електропоїзд при рекуперації являє собою специфічне джерело нестабільної енергії, що рухається в просторі і працює паралельно з тяговими підстанціями.

За допомогою вимірних параметрів для метрополітену була оцінена ефективність процесу генерації електроенергії при електричному гальмуванні. Для цього було використано ряд специфічних енергетичних показників [6], що можуть оцінити якісний рівень електроенергії, що генерується електропоїздами метрополітену при електричному гальмуванні (табл. 1), які необхідно враховувати при аналізі доцільності повернення надлишкової рекуперативної енергії до системи зовнішнього електропостачання.

Треба зауважити, що такі показники, наприклад як коефіцієнт форми, враховує не тільки рівень нестабільності рекуперативної потужності, але й опосередковано дозволяє судити про збільшення втрат енергії рекуперації при її передачі по тяговій мережі

до віддалених електропоїздів в режимі електроспоживання.

Таблиця 1

Якісні показники ефективності рекуперації електроенергії

№ п/п	Назва показника	Аналітичний вираз
1	Коефіцієнт мінімуму енергії рекуперації	$\beta = P_{min}/P_{max}$
2	Середньо-інтегральний коефіцієнт максимуму енергії рекуперації або пік-фактор	$\Pi = \frac{P_{max}}{P_{cp}} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{T} \int_0^T P(t)dt}$
3	Коефіцієнт заповнення або густина енергії рекуперації	$\gamma = \frac{P_{cp}}{P_{max}} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T P(t)dt}{P_{max}}$
4	Тривалість максимальної стабільної рекуперації	$t_{cp max} = \frac{\int P(t)dt}{P_{max}} = \gamma T$
5	Діапазон коливання потужності рекуперації	$\Delta P = P_{max} - P_{min}$
6	Динамічна характеристика рекуперації або енергетичне прискорення	$P_v = \frac{dP(t)}{dt}$
7	Коефіцієнт форми потужності рекуперації	$K_{\phi} = \frac{P}{P_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t)dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T P(t)dt}$

В приведених виразах P_{min}, P_{max}, P_{cp}, P(t) – відповідно мінімальна, максимальна, середня та миттєва потужності рекуперації поїзда

Також одним з ефективних показників рекуперативної енергії в метрополітені може служити так званий коефіцієнт нестійкості генерованої енергії, що фізично характеризує долю змінної (нестабільної) складової енергії рекуперації в її повній енергії і визначається за виразом

$$K_{нст} = \frac{\int_0^T |P(t) - P_{cp}| dt}{\int_0^T P(t) dt} \tag{4}$$

7. Результати розрахунків показників ефективності рекуперації електроенергії в умовах метрополітену

Результати розрахунку чисельних значень розглянутих коефіцієнтів за виразами табл. 1 та (4) наведені в табл. 2. В якості періоду T, за який оцінювалися показники було прийнято час руху потяга по маршруту з однієї кінцевої зупинки до другої, що для Дніпропетровського метрополітену становить 9...12 хв.

Таблиця 2

Діапазон зміни чисельних значень показників ефективності рекуперації енергії в метрополітені

β	Π	γ	$T_{\text{ср max, c}}$	$\Delta P, \text{ МВт}$	$K_{\text{ф}}$	$K_{\text{нст}}$
4...5	3...8	0,3...1,16	4...8	0,5...1,5	3...5	0,5...0,7

Як видно з табл. 2, енергія, що генерується електропоїздами при електричному гальмуванні, характеризується значною нерівномірністю в часі, її показники носять імовірнісний характер і залежать переважно від режиму руху електропоїзду. Так, величина коефіцієнта вказує на те, що енергія рекуперації володіє значною нестабільною складовою, що знаходиться в діапазоні 30...50 %, а значення коефіцієнта форми свідчать про можливі перевищення в 3...5 разів втрат рекупераційної енергії в тяговій мережі над мінімально можливими втратами при стабільній генерації. Мала тривалість максимально стабільної рекуперації енергії 4...8 с може вносити імпульсні спотворення в живлячу мережу 6 (10) кВ при використанні на тягових підстанціях інверторів енергії рекуперації.

8. Висновки

В результаті дослідних поїздок встановлено, що в Дніпропетровському метрополітені існує значний резерв енергозбереження при використанні енергії гальмування поїздів, що складає 14,4...51,6 % від витрат електроенергії на тягу.

На базі експериментально визначених параметрів генерації енергії в режимі електричного гальмування було встановлено діапазон зміни якісних показників ефективності процесу рекуперації енергії в умовах метрополітену. В режимі електричного гальмування електропоїзди метрополітену генерують енергію імпульсного характеру з середньою максимально стабільною тривалістю 4...8 с, пік-фактором 3...8, коефіцієнтом форми 3...5 та коефіцієнтом нестійкості 0,5...0,7. Незначні якісні показники ефективності рекуперації електроенергії свідчать про збільшений рівень втрат такої енергії в тяговій мережі та необхідність їх врахування при розв'язанні проблеми використання надлишкової енергії рекуперації в метрополітенах.

Література

1. 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 // Электромеханические и энергетические системы, методы моделирования и оптимизации. – КНУ им. М. Остроградского, 2012. – С. 344.
2. Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. – Д: Изд-во Маковецький, 2011. – 456 с.
3. Саблін, О. І. Моделювання взаємодії електрорухомого складу в режимі рекуперації електроенергії з розосередженою системою тягового електропостачання [Текст] / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, О. І. Бондар, В. В. Артемчук // Електрифікація транспорту. – 2014. – № 7. – С. 34–41.
4. 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>.
5. Быков, Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация и проектирование [Текст] / Е. И. Быков. – М.: Транспорт, 1983. – 447 с.
6. Шевлюгин, М. В. Ресурсо- и энергозберігаючі технології на залізничному транспорті та метрополітенах, реалізовані з використанням накопичувачів енергії [Текст]: автореф. дис... д. т. н.: 05.14.02 / М. В. Шевлюгин. – МГУПС. Москва, 2014. – 49 с.
7. Сулим, А. А. Обоснование места установки емкостных накопителей энергии в системах тягового электроснабжения метрополитена [Текст] / А. А. Сулим. – Научно-производственный журнал «Электромеханичні та енергозберігаючі системи». – 2013. – Вып. № 2/2013 (22), Ч. 2. – С. 282–285.
8. Szląg, A. Aspekty efektywności i energooszczędności w procesie modernizacji układów zasilania trakcji tramwajowej [Text] / A. Szląg, T. Maciołek, Z. Drażek, M. Patoka // Pojazdy szynowe. Kwartalnik naukowo-techniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji, budowy i badań taboru szynowego. – 2011. – № 3. – P. 34-42.
9. Аржанников, Б. А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография [Текст] / Б. А. Аржанников. – Екб: Изд-во УрГУПС, 2010. – 176 с.
10. Бурков, А. Т. Сберегающие технологии тягового электроснабжения с рекуперацией энергии торможения поездов [Текст] : тез. док. / А. Т. Бурков, В. М. Варенцов, А. Н. Марикин и др. // II Евроазиатская конференция по транспорту. – С-Пб: ЦНИИТ СЭТ, 2000. – С. 93.