

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.342:621.333.4

А. В. ДОНЧЕНКО¹, А. О. СУЛИМ^{2*}, О. С. СІОРА³, О. О. МЕЛЬНИК⁴, В. В. ФЕДОРОВ⁵

¹Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагобудування» (ДП «УкрНДІВ»), вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 03 24, ел. пошта office@ukrndiv.com.ua, ORCID 0000-0002-5302-4538

^{2*}«Науково-дослідна лабораторія електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки», ДП «УкрНДІВ», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, ел. пошта sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971

³«Науково-дослідна лабораторія електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки», ДП «УкрНДІВ», вул. І. Приходька, 33, Кременчук, Україна, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, ел. пошта Alexandrsiora@gmail.com, ORCID 0000-0001-6758-7617

⁴«Науково-дослідна лабораторія електротехнічних, динамічних, теплотехнічних та міцносних досліджень залізничної техніки», ДП «УкрНДІВ», 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», ДП «УкрНДІВ», 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

АНАЛІЗ ПИТАНЬ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Мета. На даний час актуальною є проблема значного споживання електроенергії рухомим складом під час його експлуатації. У зв'язку з поетапним підвищенням тарифів за спожиту електроенергію подальший розвиток рейкового електрорухомого транспорту, зокрема рухомого складу метрополітену, неможливий без застосування сучасних енергозберігаючих технологій та енергоефективних систем. Для вирішення зазначеної проблеми в роботі необхідно виконати аналіз заходів і визначити перспективні напрямки з енергозбереження та підвищення енергоефективності на рухомому складі метрополітену. **Методика.** Застосовуючи методи наукового аналізу, узагальнення, порівняльного аналізу, прогнозування, а також використовуючи результати експериментальних досліджень, авторами визначено основні шляхи зниження споживання електроенергії під час експлуатації рухомого складу метрополітену. Проведено аналіз витрат на електроенергію рухомим складом комунального підприємства (КП) «Київський метрополітен». Проаналізовано значну кількість досліджень вітчизняних та іноземних авторів щодо вищезазначеної проблематики. **Результати.** Основними напрямками з енергозбереження та підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену є впровадження на ньому систем рекуперації, накопичення енергії та енергоефективних систем управління. Встановлено, що впровадження систем рекуперації та накопичення енергії дозволить заощадити значну кількість електроенергії, що витрачається на тягу, проте потребує й суттєвих капіталовкладень. Зазначено, що в сучасних складних умовах розвитку економіки України перспективним напрямком енергозбереження є застосування енергоефективних систем управління. Основною перевагою цього напрямку є отримання економічного ефекту без значних капіталовкладень. **Наукова новизна.** Авторами вперше виконана оцінка потенціалу збереження електроенергії за рахунок застосування енергоефективних систем управління під час типових штатних режимів ведення рухомого складу на перегонах «Хрещатик–Театральна–Хрещатик» та «Шулявська–Берестейська–Шулявська» КП «Київський метрополітен». **Практична значимість.** Результати даних досліджень щодо кількості збереження

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

електроенергії за рахунок використання систем рекуперації, накопичення енергії та енергоефективних систем управління можуть бути використані при створенні нового або модернізації існуючого рухомого складу метрополітену.

Ключові слова: енергозбереження; енергоефективність; рухомий склад метрополітену; система рекуперації; система накопичення енергії; система управління; раціональний режим ведення

Вступ

Питання енергозбереження та енергоефективності мають велике народногосподарське значення для економіки України. У зв'язку з постійним поетапним підвищенням тарифів на електроенергію протягом 2015–2017 років [12] проблема енергозбереження та енергоефективності стає стратегічним напрямком розвитку багатьох галузей промисловості. Як наслідок, найближчим часом прогнозується збільшення витрат за споживання електроенергії для підприємств промисловості. Тому дослідження, направлені на покращення енергозбереження та підвищення енергоефективності, є своєчасними та актуальними.

Одним з потужних та енергоємних споживачів електроенергії є метрополітен [14], який має найбільші перевізні можливості порівняно з іншими видами міського транспорту. Слід зазначити, що обсяги перевезень пасажирів метрополітеном та їх частка в міських перевезеннях постійно зростає. З дослідження [13] відомо, що енергоємність перевізного процесу в метрополітенах складає на рівні 80–90 % від загального енергоспоживання галузі. Споживання електроенергії в метрополітені розподіляється таким чином [10, 14, 16]: 70 % – на тягу рухомого складу; 23 % – на виробничі потреби інфраструктури (освітлення, ескалатори і інше); 5,1 % – на споживачів наземних площадок (експлуатаційні депо, ремонтні бази та майстерні); 1,9 % – інших сторонніх споживачів.

Аналіз споживання електроенергії в метрополітені показує, що найбільш вагомою складовою є витрати на тягу рухомого складу. Таким чином, першочерговим та актуальним завданням є дослідження щодо зниження витрат на споживання електроенергії саме на тягу рухомого складу метрополітену.

Мета

Метою цієї роботи є аналіз заходів з енергозбереження та підвищення енергоефективності на рухомому складі метрополітену.

Методика

Теоретичною базою досліджень стали публікації, що висвітлюють розвиток сучасного рухомого складу, зокрема метрополітену, в напрямку застосування енергозберігаючих технологій та енергоефективних систем. В роботі використані методи наукового аналізу, узагальнення, порівняльного аналізу, прогнозування. Крім того, використано результати експериментальних досліджень з метою оцінки потенціалу збереження електроенергії за рахунок впровадження енергоефективних систем управління.

Для оцінки кількості спожитої електроенергії на тягу та витрат на електроенергію рухомим складом виконано аналіз даних показників в КП «Київський метрополітен» протягом 2011–2014 років. Кількість спожитої електроенергії на тягу рухомим складом метрополітену наведено на рис. 1.

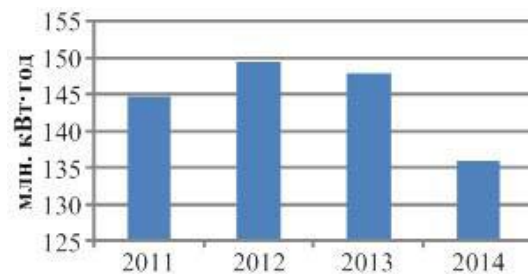


Рис. 1. Кількість спожитої електроенергії на тягу рухомим складом КП «Київський метрополітен»

Fig. 1. The amount of electricity consumed for traction by rolling stock of PU «Kyiv underground»

Діаграми витрат на електроенергію рухомим складом метрополітену приведені на рис. 2.

Дослідження виконувались на основі аналізу витрат КП «Київський метрополітен» протягом 2011–2014 років, а також шляхом розрахунку очікуваної зміни даного показника протягом 2015–2017 років, враховуючи поетапне підвищення вартості тарифів. Результати виконаних досліджень у вигляді діаграм наведено на рис. 3.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

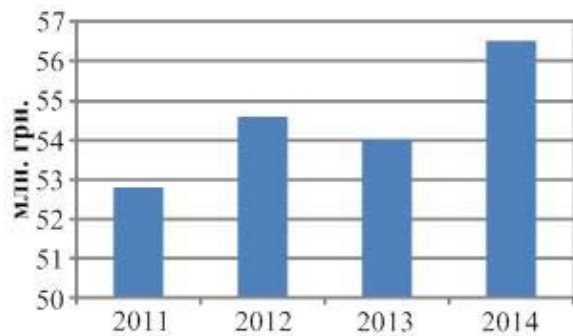


Рис. 2. Діаграми витрат на електроенергію рухомих складом КП «Київський метрополітен»

Fig. 2. Diagrams of energy costs by rolling stock of PU «Kyiv underground»

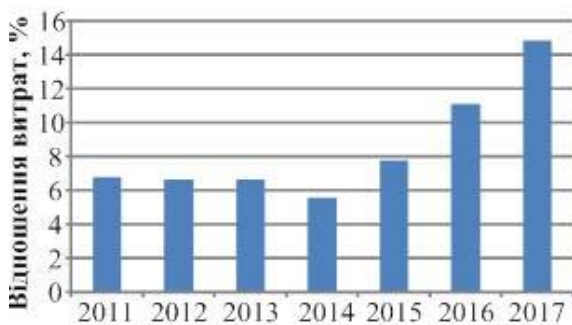


Рис. 3. Діаграми відношення витрат на електроенергію рухомих складом до загальних витрат КП «Київський метрополітен»

Fig. 3. Cost-to-cost diagrams for energy costs by rolling stock to general expenses of PU «Kyiv underground»

За результатами виконаних досліджень в КП «Київський метрополітен» (див. рис. 1–3) встановлено, що за останні роки показники кількості спожитої електроенергії та витрат на тягу рухомого складу, а також відношення витрат на електроенергію рухомих складом до загальних витрат практично залишались на одному рівні. Проте з наведених діаграм (див. рис. 3) видно, що відношення витрат на електроенергію рухомих складом до загальних витрат у 2017 році порівняно з 2014 роком збільшаться на 10 %. Наведені дослідження в черговий раз підтверджують вищезазначену тезу, що в умовах постійного підвищення вартості енергоносіїв проблема енергозбереження та енергоефективності на рухомих складі стає все більш актуальною.

З аналізу попередніх досліджень [6, 13, 14] відомо, що одним з перспективних заходів зниження споживання електроенергії на тягу

рухомого складу метрополітену є застосування рекуперативного гальмування. Це вид гальмування дозволяє використовувати значну частину кінетичної енергії рухомого складу метрополітену. До цього часу можливості режиму рекуперації використовуються не в повному обсязі, оскільки значна частина тягового обладнання експлуатованого рухомого складу метрополітену не має можливості генерувати енергію в контактну мережу під час гальмування. За результатами численних досліджень [14–17, 18] встановлено, що впровадження систем рекуперації на рухомих складі метрополітену дозволить скоротити споживання електроенергії на тягу до 40 %.

Впровадження систем рекуперації передбачає використання тягового реверсивного перетворювача, вимірювальних датчиків та системи управління. Перетворювач дозволяє регулювати енергообмін між контактною мережею та двигуном в режимах тяги та рекуперативного гальмування. Вимірювальні датчики контролюють значення електричних величин під час енергообмінних процесів. Система управління здійснює рекуперативне гальмування за наявності споживачів в мережі та реостатне гальмування за допомогою блоків резисторів за їх відсутності. Отже, впровадження систем рекуперації дозволяє заощадити значну кількість електроенергії, що витрачається на тягу, проте потребує і суттєвих капіталовкладень, серед яких витрати на вищезазначене обладнання та його обслуговування.

На цей час в метрополітенах України перевезення пасажирів забезпечується, насамперед, поїздами з колекторними двигунами постійного струму послідовного збудження та релейно-контакторними системами управління. З метою скорочення споживання електроенергії на тягу в останні роки створюється та модернізується вітчизняний рухомий склад метрополітену. В 2012 році на засіданні Міжвідомчої комісії за результатами виконання приймальних випробувань дослідних зразків вагонів метрополітену моделей 81-7036, 81-7037, 81-7037-01, 81-7037-02 виробництва ПАТ «КВБЗ» прийнято рішення щодо можливості серійного виробництва зазначених моделей вагонів. В 2014 році ПАТ «КВБЗ» спільно з іншими вітчизняними та іноземними підприємствами модернізовано та введено в експлуатацію 19 п'ятивагонних поїз-

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

дів КП «Київський метрополітен» за фондом Зелених інвестицій. Головними відмінностями новоствореного та модернізованого рухомого складу є використання асинхронного електропривода змінного струму, мікропроцесорної системи управління, а також впровадження іншого енергозберігаючого обладнання та технологій, насамперед систем рекуперації. За результатами досліджень [4] відомо, що модернізація існуючого рухомого складу у відношенні до п'ятивагонного зчепу дозволяє скоротити споживання електроенергії з мережі на понад 40 %. Таким чином, в КП «Київський метрополітен» виконуються заходи з енергозбереження та підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену шляхом заміни застарілого тягового обладнання на нове з реалізацією рекуперативного гальмування.

Проте в умовах реальної експлуатації на величину використання електроенергії рекуперації впливає багато факторів [7, 13–15]. Серед основних можна виділити так: інтенсивність руху в зоні рекуперації, режим руху інших споживачів електроенергії, відстань між станціями та профіль колії. За результатами аналізу досліджень [13, 14] встановлено, що за існуючої інфраструктури системи тягового енергозабезпечення метрополітену використання електроенергії рекуперації має імовірнісний характер та не перевищує 30 %. Таким чином, в цей час можливості рекуперації використовуються не в повному обсязі і існує проблема реалізації надлишкової електроенергії за відсутності споживачів в зоні рекуперації [7, 13–17, 18].

Аналіз досліджень [6, 10, 13–17, 18] показав можливість додаткового енергозбереження та підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену з системами рекуперації за рахунок ефективного використання електроенергії гальмування шляхом застосування систем накопичення енергії. З джерел [1, 13, 14] відомо, що за допомогою впровадження систем накопичення енергії можна додатково скоротити близько 10–20 % електроенергії, що витрачається на тягу.

Впровадження систем накопичення енергії передбачає використання реверсивного перетворювача постійного струму, вимірювальних датчиків в колі накопичувача, системи управління і власне накопичувача. Реверсивний пе-

ретворювач постійного струму дозволяє здійснювати енергообмін між контактною мережею, двигуном та накопичувачем. Вимірювальні датчики контролюють значення струму та напруги в колі накопичувача. Система управління здійснює регулювання енергообмінних процесів в режимах тяги та рекуперативного гальмування за показниками вимірювальних датчиків. Накопичувач дозволяє зберігати та повторно використовувати надлишкову електроенергію рекуперації. Отже, впровадження систем накопичення дозволяє додатково заощадити значну кількість електроенергії, що витрачається на тягу, проте потребує також суттєвих капіталовкладень, серед яких витрати на вищезазначене обладнання та його обслуговування.

Теоретичних досліджень за напрямком застосування систем накопичення енергії на залізничному транспорті, зокрема в метрополітенах, чимало. Основні питання, що розглядаються під час цих досліджень такі: вибір типу накопичувача та його раціональне розміщення в системі тягового енергозабезпечення, визначення раціональних параметрів накопичувача та перетворювача, кількісна оцінка збереженої електроенергії за рахунок використання накопичувачів, розробка ефективної системи управління енергообмінними процесами, при якій забезпечується мінімізація спожитої електроенергії з контактної мережі.

На сьогодні системами накопичення енергії оснащені метрополітени США, Англії, Японії, Франції, Росії, проте в метрополітенах України ці системи не застосовуються. До цього часу особливих потреб у їх застосуванні не було. Основною причиною, що стримувала впровадження цих систем в метрополітенах України, була відсутність експлуатованого рухомого складу з системами рекуперації. Таким чином, з введенням в експлуатацію рухомого складу з системами рекуперації, впровадження систем накопичення в метрополітенах України стає актуальним.

Ще одним перспективним заходом з енергозбереження та підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену є використання раціональних режимів ведення поїзда на перегоні за критерієм мінімуму споживання електроенергії з мережі [2, 3, 5, 8, 9, 11, 19, 20]. З аналізу джерел відомо, що впровадження раціональних режимів ведення рухомого складу

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

метрополітену дозволить скоротити споживання електроенергії з мережі до 7 % [2, 8].

Визначення раціонального режиму ведення рухомого складу метрополітену на перегоні передбачає використання штатних вимірювальних датчиків та мікропроцесорної системи управління. Вимірювальні датчики контролюють значення струму, напруги контактної мережі та швидкості руху. Мікропроцесорна система управління здійснює визначення раціонального режиму ведення за заданими умовами та обмеженнями. Мікропроцесорна система може бути як інтегрована в загальну систему управління поїздом, так і функціонувати окремо. Впровадження цієї системи порівняно з системами рекуперації та накопичення дозволяє отримати економічний ефект при значно менших капіталовкладеннях.

Значна кількість досліджень присвячена напрямкам визначення раціонального режиму ведення рухомого складу метрополітену на перегоні за критерієм мінімуму споживання електроенергії з мережі. Основні питання, що розглядаються під час цих досліджень такі: обґрунтування числового методу вирішення диференційного рівняння руху поїзда (методи Тейлора, Рунге-Куте, Ейлера та інші), обґрунтування використання методу вирішення раціональної задачі (класичне варіаційне обчислення, принцип максимуму, дискретний варіант метода динамічного програмування та інші), синтез та розробка мікропроцесорної системи управління поїздом метрополітену. Слід зазначити, що наразі значна кількість досліджень направлена на розробку мікропроцесорної системи управління для сучасного рухомого складу з асинхронним тяговим приводом та можливістю рекуперативного гальмування.

На сьогодні мікропроцесорними системами управління, що дозволяють визначати раціональний режим ведення за критерієм мінімального споживання електроенергії, оснащений рухомий склад метрополітенів США, Англії, Японії, Франції, Італії. Також зазначені системи починають впроваджувати в Росії, зокрема на Казанському та Петербурзькому метрополітенах [3]. Крім того, багато метрополітенів світу мають мережі автоматизованого метрополітену, де рухомий склад обладнаний системами автоведення та курсує без машиністів. Автоматизовані метрополітени експлуатуються в Дубаї,

Нюрнберзі, Ліоні, Парижі, Сінгапурі, Барселоні та інших містах. На цей час експлуатований парк метрополітенів України обладнаний системами автоматичної локомотивної сигналізації з автоматичним регулюванням швидкості (АЛС–АРШ), що призначена для безпеки руху поїздів. Система АЛС–АРШ забезпечує безперервну передачу сигнальних показань у кабінку управління рухомого складу про дозволена швидкість руху, контроль зайнятості колії та швидкості руху поїзда, автоматичне зниження швидкості чи зупинку поїзда при її перевищенні, контроль пильності машиніста. Проте зазначена система не дозволяє визначати раціональний режим ведення рухомого складу метрополітену на перегоні залежно від його завантаження за критерієм мінімуму споживання електроенергії. Отже, експлуатований рухомий склад метрополітенів України, в тому числі сучасний з асинхронним тяговим електроприводом і функцією рекуперативного гальмування, обладнаний системами безпеки руху без можливості енергоефективного управління процесом перевезення. Таким чином, в сучасних складних умовах розвитку економіки України, одним з першочергових завдань є оснащення вітчизняного рухомого складу метрополітену енергоефективними системами управління, оскільки порівняно з іншими енергозберігаючими системами вони потребують менших капіталовкладень.

Для оцінки потенціалу збереження кількості електроенергії за рахунок застосування енергоефективних систем управління, які дозволяють визначати раціональний режим ведення рухомого складу метрополітену на перегоні, в КП «Київський метрополітен» виконані експериментальні дослідження. Дослідження здійснювались з використанням випробувального комплексу, до складу якого входить п'ятивагонний поїзд та вимірювальна система, встановлена на його борту. Експерименти виконані під час типових штатних режимів ведення рухомого складу на перегонах «Хрещатик–Театральна–Хрещатик» та «Шулявська–Берестейська–Шулявська» при його номінальному завантаженні з дотриманням «непікового» та «пікового» графіків руху. Результати досліджень у вигляді графіків залежності кількості спожитої електроенергії від часу руху на перегоні наведено на рис. 4. Траєкторії проходження перегону

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

«Хрещатик–Театральна» за умов дотримання «непікового» графіка руху наведено на рис. 5.

За виконаними дослідженнями в КП «Київський метрополітен» (див. рис. 4, 5) встановлено, що потенціал збереження електроенергії за рахунок використання енергоефективних мік-

ропроцесорних систем управління на перегонах: «Хрещатик–Театральна» складає до 7 %; «Театральна–Хрещатик» – до 5 %; «Шулявська–Берестейська» – до 1,5 %; «Берестейська–Шулявська» – до 10 %.

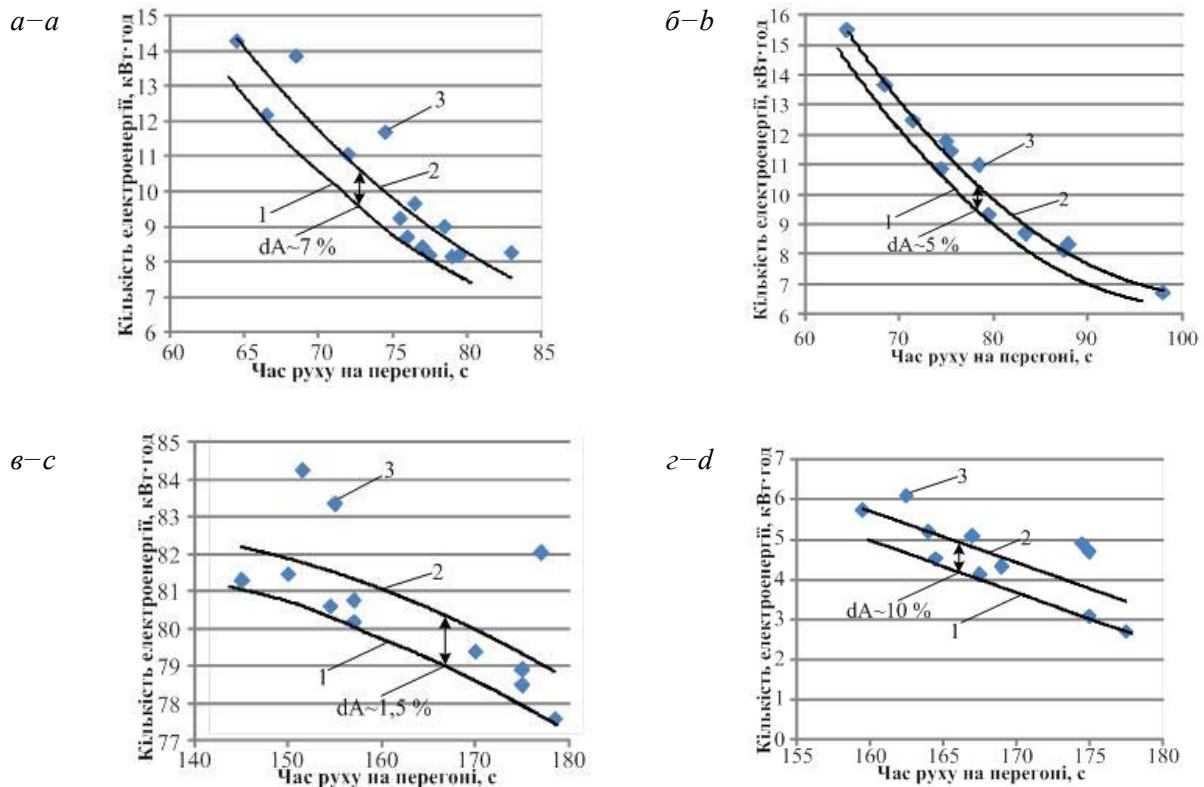


Рис. 4. Потенціал економії електроенергії за рахунок застосування раціональних режимів ведення поїзда на перегонах «Хрещатик–Театральна» (а), «Театральна–Хрещатик» (б), «Шулявська–Берестейська» (в) та «Берестейська–Шулявська» (з):
 1 – мінімально можливе споживання електроенергії;
 2 – споживання електроенергії під час типових режимів ведення;
 3 – споживання електроенергії під час різних режимів ведення;
 dA – економія за рахунок застосування енергоефективних режимів ведення

Fig. 4. Potential of energy savings through the use of rational modes at train driving on running lines «Khreshchatyk–Teatralna» (a) «Teatralna–Khreshchatyk» (b) «Shuliavska–Beresteiska» (c) and «Beresteiska–Shuliavska» (d):
 1 – the lowest possible power consumption;
 2 – power consumption at typical modes of driving;
 3 – power consumption at various modes of driving;
 dA – savings due to the use of energy-efficient modes of driving

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

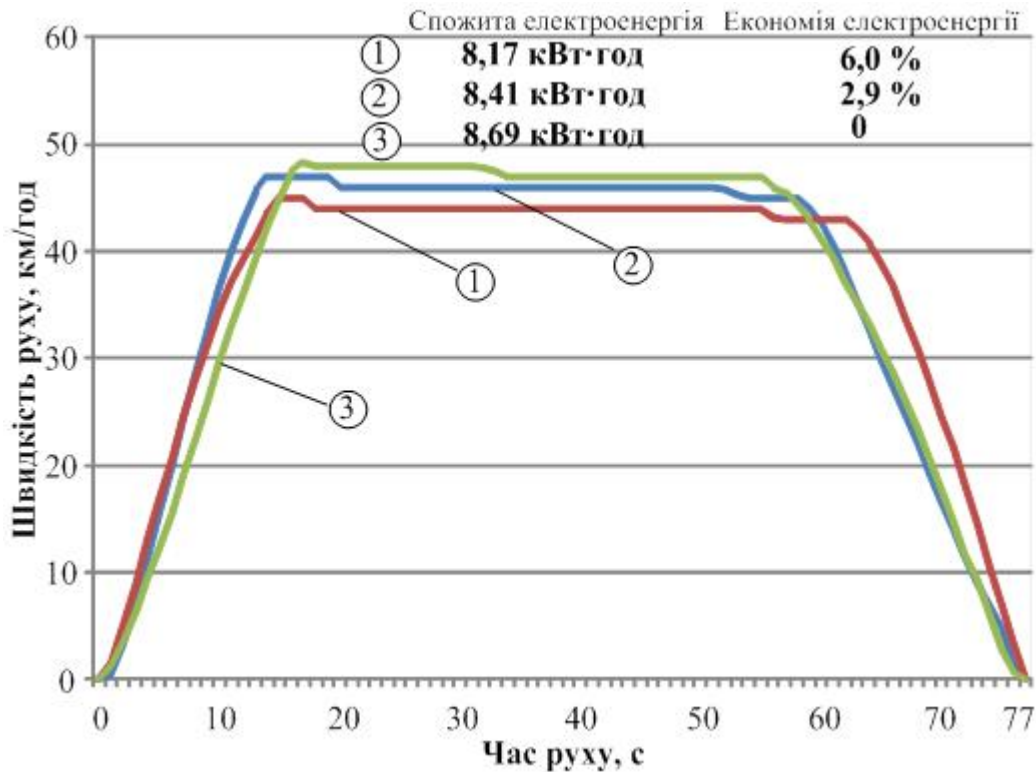


Рис. 5. Графіки проходження перегону «Хрещатик–Театральна» під час типових режимів ведення рухомого складу за «непіковим» графіком

Fig. 5. Passing diagram on running line «Khreshchatyk–Teatralna» at typical modes of rolling stock driving as per «off-peak» schedule

Результати

Основними напрямками з енергозбереження та підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену є впровадження на ньому систем рекуперації, систем накопичення енергії та мікропроцесорних систем управління. Встановлено, що впровадження систем рекуперації та накопичення енергії дозволить заощадити значну кількість електроенергії, що витрачається на тягу, проте потребує і суттєвих капіталовкладень.

Зазначено, що в сучасних складних умовах розвитку економіки України перспективним напрямком з енергозбереження є застосування енергоефективних систем управління, які дозволяють визначити раціональний режим ведення рухомого складу на перегоні. Основною перевагою цього напрямку є отримання економічного ефекту без значних капіталовкладень.

Наукова новизна та практична значимість

Вперше виконана оцінка потенціалу збереження електроенергії за рахунок застосування енергоефективних систем управління під час типових штатних режимів ведення рухомого складу на перегонах «Хрещатик–Театральна–Хрещатик» та «Шулявська–Берестейська–Шулявська» КП «Київський метрополітен». Результати досліджень щодо кількості збереження електроенергії за рахунок використання систем рекуперації, накопичення енергії та енергоефективних систем управління можуть бути використані під час створення нового або модернізації існуючого рухомого складу метрополітену.

Висновки

За результатами аналізу значної кількості теоретичних та виконаних експериментальних досліджень встановлено:

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

– впровадження систем рекуперації на рухомому складі метрополітену дозволить скоротити до 40 % електроенергії, що споживається на тягу;

– застосування систем накопичення енергії дозволить додатково зберегти близько 10–20 % електроенергії, що споживається на тягу рухомих складом метрополітену з системами рекуперації, за рахунок ефективного використання електроенергії гальмування за відсутності споживачів;

– впровадження мікропроцесорних енергоефективних систем управління, що визначають раціональні режими ведення рухомого складу метрополітену на перегоні, дозволить скоротити споживання електроенергії з мережі до 10 %.

В сучасних складних умовах розвитку економіки України впровадження енергоефективних систем управління є перспективним напрямком з енергозбереження на рухомому складі, оскільки порівняно з іншими енергозберігаючими системами потребують менших капіталовкладень. Слід також зазначити, що ці системи можна розміщати на різних типах експлуатованого рухомого складу метрополітену (з наявністю систем рекуперації та без них). Крім того, застосування цих систем дозволить підвищити безпеку руху, стабілізувати графік руху поїздів на лінії та полегшити управління поїздом машиністам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бычкова, М. П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро / М. П. Бычкова // Энергосовет. – 2011. – Вып. 3 (16). – С. 74–76.
2. Васильева, М. А. Энергооптимальные режимы управления движением поезда метрополитена : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Васильева Марина Алексеевна ; Моск. гос. ун-т путей сообщения. – Москва, 2003. – 182 с.
3. Голынский, А. П. Автоведение поездов метрополитена – базовая функция системы «Движение» / А. П. Голынский, А. Б. Жданович // Транспорт Рос. Федерации. – 2011. – № 3 (34). – С. 44–45.
4. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» / А. В. Донченко, С. О. Мужичук, А. О. Сулим [та ін.] // Рейковий рухний склад : зб. наук. пр. – Кременчук, 2015. – Вип. 12. – С. 48–56.
5. Кислий, Д. М. Визначення енергозощаджуючих режимів ведення поїздів / Д. М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. – 2016. – № 1 (61). – С. 71–84. doi: 10.15802/stp2016/60983.
6. Колб, А. А. Использование энергии рекуперации электротранспорта для управления качеством электроэнергии / А. А. Колб // Вісн. Кременч. нац. ун-ту ім. Михайла Остроградського. – Кременчук, 2010. – Вип. 4 (63), ч. 1. – С. 98–102.
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. Мелешин, И. С. Как экономить на тягу / И. С. Мелешин // Энергоэффективность и энергосбережение. – 2013. – № 7–8. – С. 65–67.
9. Носков, В. И. Задача синтеза системы управления движением транспортного средства / В. И. Носков // Коммунал. хоз-во городов : науч.-техн. сб. – Харьков, 2002. – Вып. 55. – С. 166–171.
10. Омеляненко, Г. В. Электромеханический преобразователь энергии инерционного накопителя для сетей тягового электроснабжения : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.01 / Омеляненко Галина Викторовна ; Харьк. гос. политехн. ун-т. – Харьков, 1999. – 169 с.
11. Оптимизация управления движением поездов / Л. А. Баранов, Е. В. Ерофеев, И. С. Мелешин, Л. М. Чинь ; под ред. доктора техн. наук Л. А. Баранова. – Москва : МИИТ, 2011. – 164 с.
12. Про встановлення тарифів на електроенергію, що відпускається населенню : пост. Нац. комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 220 від 26.02.2015 р. // Офіц. вісн. України. – 2015. – № 15/1. – С. 5–12.
13. Саблін, О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О. І. Саблін // Східно-Європ. журн. перед. технологій. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 9–13.
14. 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.
15. Улитин, В. Г. Проблема использования избыточной энергии рекуперации на городском

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

- электрическом транспорте / В. Г. Улитин // Коммунал. хоз-во городов : науч.-техн. сб. – Харьков, 2009. – Вып. 88. – С. 266–271.
16. 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.
 17. 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-т. – Новосибирск, 2008. – Вып. 1 (51). – С. 99–104.
 18. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems / X. Yang, A. Chen, X. Li [et al.] // Transportation Research Part C. Emerging Technologies. – 2015. – Vol. 57. – P. 13–29. doi: 10.1016/j.trc.2015.05.002.
 19. Energy efficiency on train control: design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices [Электронный ресурс] / M. Domínguez, A. P. Cucala, A. Fernández [et al.] // 9th World Congress on Railway Research (22.05–26.05.2011). – Madrid, 2011. – P. 1–12. – Режим доступа: http://www.vialibre-ffe.com/pdf/Dominguez_Maria.pdf. – Назва з екрана. – Перевірено : 26.05.2016.
 20. Li, X. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations / X. Li, H. K. Lo // Transportation Research Part B: Methodological. – 2014. – Vol. 64. – P. 73–89. doi: 10.1016/j.trb.2014.03.006.

А. В. ДОНЧЕНКО¹, А. А. СУЛИМ^{2*}, А. С. СИОРА³, А. А. МЕЛЬНИК⁴, В. В. ФЕДОРОВ⁵

¹Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения» (ГП «УкрНИИВ»), ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 03 24, эл. почта office@ukrdiv.com.ua,

^{2*}«Научно-исследовательская лаборатория электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники», ГП «УкрНИИВ», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, эл. почта sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-5302-4538, ORCID 0000-0001-8144-8971

³«Научно-исследовательская лаборатория электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники», ГП «УкрНИИВ», ул. И. Приходько, 33, Кременчуг, Украина, 39621, тел. +38 (053) 666 20 43, эл. почта Alexandrsiora@gmail.com, ORCID 0000-0001-6758-7617

⁴«Научно-исследовательская лаборатория электротехнических, динамических, теплотехнических и прочностных исследований железнодорожной техники», ГП «УкрНИИВ», 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», ГП «УкрНИИВ», 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

АНАЛИЗ ВОПРОСОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА

Цель. В настоящее время актуальной является проблема значительного потребления электроэнергии подвижным составом при его эксплуатации. В связи с поэтапным повышением тарифов за потребляемую электроэнергию дальнейшее развитие рельсового электроподвижного транспорта, в частности подвижного состава метрополитена, невозможно без использования современных энергосберегающих технологий и энергоэффективных систем. Для решения обозначенной проблемы в работе необходимо выполнить анализ мероприятий и определить перспективные направления по энергосбережению и повышению энергоэффективности на подвижном составе метрополитена. **Методика.** Применяя методы научного анализа, обобщения, сравнительного анализа, прогнозирования, а также используя результаты экспериментальных исследований, авторами определены основные пути снижения потребления электроэнергии при эксплуатации подвижного состава метрополитена. Проведен анализ затрат на электроэнергию подвижным составом коммунального предприятия (КП) «Киевский метрополитен». Проанализировано значительное количество исследований отечественных и зарубежных авторов по вышеизложенной проблематике. **Результаты.** Основными направлениями по энергосбережению и повышению энергоэффективности подвижного состава метрополитена являются внедрение на нем систем рекуперации, накопления энергии и энергоэффективных систем управления. Установлено, что внедрение

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

систем рекуперации и накопления энергии позволит сэкономить значительное количество электроэнергии, потребляемой на тягу, но требует и существенных капиталовложений. Указано, что в современных сложных условиях развития экономики Украины перспективным направлением энергосбережения является применение энергоэффективных систем управления. Основным преимуществом этого направления является получение экономического эффекта без значительных капиталовложений. **Научная новизна.** Авторами впервые выполнена оценка потенциала сбережения электроэнергии за счет применения энергоэффективных систем управления при типовых штатных режимах ведения подвижного состава на перегонах «Крещатик–Театральная–Крещатик» и «Шулявская–Берестейская–Шулявская» КП «Киевский метрополитен». **Практическая значимость.** Результаты данных исследований по количеству сохраняемой электроэнергии за счет использования систем рекуперации, накопления энергии и энергоэффективных систем управления могут быть использованы при создании нового или модернизации существующего подвижного состава метрополитена.

Ключевые слова: энергосбережение; энергоэффективность; подвижной состав метрополитена; система рекуперации; система накопления энергии; рациональный режим ведения

A. V. DONCHENKO¹, A. O. SULYM^{2*}, A. S. SIORA³, A. A. MELNYK⁴, V. V. FEDOROV⁵

¹State Enterprise «Ukrainian Research Railway Car Building Institute» (SE «UkrNIIV»), I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (053) 666 03 24, e-mail office@ukrndiv.com.ua, ORCID 0000-0002-5302-4538

^{2*}«Research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles», SE «UkrNIIV», I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (053) 666 20 43, e-mail sulim1.ua@gmail.com, ORCID 0000-0001-8144-8971

³«Research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles», SE «UkrNIIV», I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (05366) 6 20 43, e-mail Alexandrsiora@gmail.com, ORCID 0000-0001-6758-7617

⁴«Research laboratory of electrotechnical, dynamic, thermotechnical and strength research of railway vehicles», SE «UkrNIIV», I. Prikhodko St., 33, Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (053) 666 20 43, e-mail shurik110982@gmail.com, ORCID 0000-0001-8964-4790

⁵«Research laboratory of freight and special rolling stock» SE «UkrNIIV», 33, I. Prikhodko St., Kremenchug, Ukraine, 39621, tel. +38 (053) 666 13 84, e-mail F.vladimir.ua@gmail.com, ORCID 0000-0002-0963-7265

ANALYSIS OF ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY ISSUES DURING OPERATION OF THE METRO ROLLING STOCK

Purpose. Nowadays a problem of significant power consumption of the rolling stock during its operation is a current issue. In connection with staged electricity rates increase further development of the rail electric transport, including metro rolling stock is impossible without a use of modern energy saving solutions and energy-efficient systems. To solve the specified problem it is necessary to carry out analysis of measures and determine prospective directions in energy saving and increase of energy efficiency on the metro rolling stock. **Methodology.** Using methods of scientific analysis, generalization, comparative analysis, forecasting and using results of experimental studies, the authors determined main ways for reduction of energy consumption during operation of the metro rolling stock. Energy cost analysis for metro rolling stock of the public utility (PU) «Kiev Metro» was carried out. A great number of research works of native and foreign authors concerning the above mentioned problem were analyzed. **Findings.** Principal directions in energy saving and increase of energy efficiency of the metro rolling stock are implementation of recuperation systems, energy storage systems and energy-efficient control systems. It was determined that implementation of recuperation and energy storage systems helps to save a considerable amount of energy, consumed for traction, but it involves substantial investments. It is pointed out that in current complicated conditions of economic development of Ukraine, use of energy-efficient control systems is a perspective direction in energy saving. Main advantage of this direction is the economic effect obtaining without significant investments. **Originality.** For the first time was performed potential assessment for energy saving as a result of energy-efficient control systems use at type routine rolling stock operation modes on sections «Khreschatik –Teatralnaya – Khreschatik» and «Shulyavskaya –Beresteyskaya –Shulyavskyaya» of KP «Kiev Metro». **Practical value.** Results of the research concerning quantity of energy saved with the help of recuperation systems and energy saving control systems can be used during building of a new metro rolling stock or modernization of existing one.

Keywords: energy saving; energy efficiency; metro rolling stock; recuperation system, energy saving system; rational operation mode

REFERENCES

1. Bychkova M.P. Sistema nakopiteley elektroenergii dlya povysheniya energoeffektivnosti v metro [System of energy storage for energy efficiency in the subway]. *Energosovet – Energocouncil*, 2011, issue 3, no. 16, pp. 74-76.
2. Vasilyeva M.A. *Energooptimalnyye rezhimy upravleniya dvizheniyem poyezda metropolitena*. Kand., Diss. [Energy optimized control modes by the movement of subway trains. Cand, Diss]. Moscow, 2003. 182 p.
3. Golynskiy A.P., Zhdanovich A.B. Avtovedeniye poyezdov metropolitena – bazovaya funktsiya sistemy «Dvizheniye» [Automated driving underground trains – the basic function of the system «Movement»]. *Transport Rossiyskoy Federatsii – The Transport Of The Russian Federation*, 2011, issue 3, no 34, pp. 44-45.
4. Donchenko A.V., Muzhychuk S.O., Sulym A.O., Khozia P.O., Melnyk O.O. Doslidzhennia enerhoefektivnosti modernizovanoho poizda metropolitenu vyrobnytstva PAT «KVBZ» [A study of energy efficiency of a modernized train of the metro production of «KRCBW» PJSC]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reykovyi rukhomyi sklad»* [Proc. «Rail rolling stock»], 2015, issue 12, pp. 48-56.
5. Kyslyi D.M. Vyznachennia enerhozaoshchadzhuiuchykh rezhymiv vedennia poizdiv [Energy saving modes definition of trains handling]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, 2016, no. 1 (61), pp. 71-84. doi: 10.15802/stp2016/60983.
6. Kolb A.A. Ispolzovaniye energii rekuperatsii elektrotransporta dlya upravleniya kachestvom elektroenergii. [The use of the regenerative energy of electric vehicle to control the quality of electricity]. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu im. Mykhaila Ostrohradskoho* [Bulletin of KSU named after Mikhail Ostrogradsky], 2010, no. 4 (63), part 1, pp. 98-102.
7. Kostin N.A., Nikitenko A.V. Avtonomnost rekuperativnogo tormozheniya – osnova nadezhnoy energoeffektivnoy rekuperatsii na elektropodvizhnom sostave postoyannogo toka [Autonomy regenerative braking – the basis for reliable energy-efficient heat recovery in electric rolling stock DC]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway Transport of Ukraine*, 2014, issue 3, pp. 15-23.
8. Meleshin I.S. Kak sekonomit na tyagu [How to save money on cravings]. *Energoeffektivnost i energosberezheniye – Energy Efficiency and Energy Saving*, 2013, issue 7-8, pp. 65-67.
9. Noskov V.I. Zadacha sinteza sistemy upravleniya dvizheniyem transportnogo sredstva [The problem of designing the motion control system of vehicle]. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik «Kommunalnoye khozyaystvo gorodov»* [Scientific and technical collection «Municipal economy of cities»], 2002, issue 55, pp. 166-171.
10. Omelyanenko G.V. *Elektromekhanicheskiiy preobrazovatel energii inertsiionnogo nakopitelya dlya setey tyagovogo elektrosnabzheniya* Cand., Diss [Electromechanical energy converter with inertial storage for traction power supply networks]. Kharkov, 1999. 169 p.
11. Baranov L.A., Yerofeyev Ye.V., Meleshin I.S., Chin L.M. *Optimizatsiya upravleniya dvizheniyem poyezdov* [Optimization of train traffic control]. Moscow, MIIT Publ., 2011. 164 p.
12. Pro vstanovlennia taryfiv na elektroenerhiu, shcho vidpuskaietsia naseleenni: Postanova Natsionalnoi komisii, shcho zdiisniuie derzhavne rehuliuivannia u sferakh enerhetyky ta komunalnykh posluh № 220 vid 26.02.2025 r. [On the establishment of tariffs for electricity, supplied to the population: National Commission Resolution, carrying out state regulation in the spheres of energy and communal services No. 220 from 26.02.2015]. *Ofitsiyniy visnyk Ukrainy – Official Herald of Ukraine*, 2015, issue 15/1, pp. 5-12.
13. Sablin O.I. Doslidzhennia efektyvnosti protsesu rekuperatsii elektroenerhii v umovakh metropolitenu [Research of efficiency of recovery of electricity under metro]. *Skhidno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnolohii– East-European Journal of Advanced Technologies*, 2014, issue 6/8 (72), pp. 9-13.
14. Sulim A.A. Povsheniye effektivnosti energoobespecheniya podvizhnogo sostava metropolitena s sistemami rekuperatsii putem primeneniya emkostnykh nakopiteley energii Cand., Diss [Improvement of power supply the efficiency of the metro rolling stock equipped with recuperation systems by using a capacitive energy storage]. Kiyev, 2015. 188 p.
15. Ulitin V.G. Problema ispolzovaniya izbytochnoy energii rekuperatsii na gorodskom elektricheskom transporte [The use of excess energy recovery of urban electric transport]. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik «Kommunalnoye khozyaystvo gorodov»* [Scientific and technical collection «Municipal Economy of Cities»], 2009, issue 88, pp. 266-271.
16. Shevlyugin M.V., Zheltov K.S. Snizheniye raskhoda elektroenergii na dvizheniye poyezdov v Moskovskom metropolitene pri ispolzovanii emkostnykh nakopiteley energii [Reduction of energy consumption for the movement of trains in the Moscow metro when using capacitive energy storage]. *Nauka i tekhnika transporta – Science and Technology of Transport*, 2008, issue 1, pp. 15-20.

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ТРАНСПОРТ

17. Shchurov N.I., Shcheglov K.V., Shtang A.A. Primeneniye nakopiteley energii v sistemakh elektricheskoy tyagi [The use of energy storage systems of electric traction]. *Sbornik nauchnykh trudov NGTU* [Collection of scientific papers of NSTU], 2008, issue 1 (51), pp. 99-104.
18. Yang X., Chen A., Li X., Ning B., Tang T. An energy-efficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems. *Transportation Research Part C. Emerging Technologies*, 2015, vol. 57, pp. 13–29. doi: 10.1016/j.trc.2015.05.002.
19. Domínguez M., Cucala A.P., Fernández A., Pecharromán R.R., Blanquer J. Energy efficiency on train control: design of metro ATO driving and impact of energy accumulation devices. 9th World Congress on Railway Research (22.05–26.05.2011). Madrid, 2011, pp. 1-12. Available at: http://www.vialibreffe.com/pdf/Dominguez_Maria.pdf (Accessed 26 May 2016).
20. Li X., Lo H.K. An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, vol. 64, pp. 73–89. doi: 10.1016/j.trb.2014.03.006.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. О. П. Чорним (Україна); к.т.н., П. О. Хозя (Україна); д.т.н., проф. А. М. Афанасовим (Україна)

Надійшла до редколегії: 11.02.2016

Прийнята до друку: 31.05.2016