**ОЦІНКА РЕЗЕРВІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПІД ЧАС ШТАТНИХ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
РУХОМОГО СКЛАДУ МЕТРОПОЛІТЕНУ З СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦІЇ****А. О. Сулим, Е. В. Третяк, П. О. Хозя, О. О. Мельник**

Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування»

вул. І. Приходька, 33, м. Кременчук, 39621, Україна. E-mail: sulim1.ua@gmail.com

С. О. Мужичук

Публічне акціонерне товариство «Крюківський вагонобудівний завод»

вул. І. Приходька, 139, м. Кременчук, 39621, Україна. E-mail: zgk_metro@kvsz.com

В статті розглянуто питання оцінки резервів енергозбереження в метрополітені на двох дослідних ділянках Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен» (відносно рівна ділянка колії на перегоні Хрещатик–Театральна–Хрещатик та ділянка з затижним ухилом 42 % на перегоні Шулявська–Берестейська–Шулявська) за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу. Розроблено експериментальний випробувальний комплекс для дослідження енергообмінних процесів між контактною мережею та рухомим складом метрополітену з системами рекуперації. За результатами аналізу експериментальних досліджень для заданих умов експлуатації визначено резерви заощаджень енергоресурсів на зазначених ділянках. Встановлено, що за реальних умов експлуатації на загальну кількість електроенергії, яка споживається з контактної мережі та виділяється під час рекуперативного гальмування рухомого складу, впливає багато факторів. Основними факторами впливу є профіль колії на ділянці, графік руху (експлуатаційна швидкість), завантаженість вагонів. З використанням методу планування експерименту визначено, що найбільш значущим фактором впливу на кількість електроенергії, яка споживається з контактної мережі та виділяється під час рекуперативного гальмування, є профіль колії.

Ключові слова: поїзд, рекуперативне гальмування, рухомий склад метрополітену, система рекуперації, енергозбереження, енергоефективність.

**ОЦЕНКА РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ШТАТНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА С СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦИИ****А. А. Сулим, Э. В. Третяк, П. А. Хозя, А. А. Мельник**

Государственное предприятие «Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения»

ул. И. Приходько, 33, г. Кременчук, 39621, Украина. E-mail: sulim1.ua@gmail.com

С. А. Мужичук

Публичное акционерное общество «Крюковский вагоностроительный завод»

ул. И. Приходько, 139, г. Кременчук, 39621, Украина. E-mail: zgk_metro@kvsz.com

В статье рассмотрен вопрос оценки резервов энергосбережения в метрополитене на двух опытных участках Святошинско-Броварской линии КП «Киевский метрополитен» (относительно ровный участок пути на перегоне Хрещатик–Театральная–Хрещатик и участок с затижным уклоном 42% на перегоне Шулявская–Берестейская–Шулявская) за счет эффективного использования электроэнергии рекуперативного торможения подвижного состава. Разработан экспериментальный испытательный комплекс для исследования энергообменных процессов между контактной сетью и подвижным составом метрополитена с системами рекуперации. По результатам анализа экспериментальных исследований для заданных условий эксплуатации определены резервы экономии энергоресурсов на обозначенных участках. Установлено, что при реальных условиях эксплуатации на количество электроэнергии, которое потребляется из контактной сети и выделяется при рекуперативном торможении подвижного состава, влияет много факторов. Основными факторами влияния являются профиль пути на участке, график движения (эксплуатационная скорость), загрузка вагонов. С использованием метода планирования эксперимента определено, что наиболее весомым фактором влияния на количество потребляемой и выделяемой электроэнергии при рекуперативном торможении, является профиль пути.

Ключевые слова: поезд, рекуперативное торможение, подвижной состав метрополитена, система рекуперации, энергосбережение, энергоэффективность.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. В сучасних умовах мегаполіса метрополітен є важливим видом громадського транспорту, економічне та надійне функціонування якого багато в чому залежить від стійкої роботи всіх елементів системи. Однією з проблем під час експлуатації метрополітену на сьогоднішній день є значне споживання електроенергії на тягу. На даний час у парку вітчизняного метрополітену переважно знаходяться вагони серії Є та їх модифікації, а також вагони моделей 81.717/714 з терміном експлуатації понад 35 років, обладнані двигунами постійного струму послідовного збудження з релейними системами керування [1]. Такі вагони споживають значну кількість електроенергії на тягу та за технічними показниками значно поступаються сучасним інноваційним вагонам. Тому заощадження електроенергії на тягу рухомого складу та підвищення енергоефективності в цілому є важливим завданням в метрополітені.

В останні роки, з метою скорочення споживання

електроенергії на тягу, вітчизняними метрополітемами поступово вводиться в експлуатацію як новотворений, так і модернізований рухомий склад. Це, передусім, рухомий склад метрополітену, який складається з вагонів моделей 81-7036, 81-7037, 81-7080, 81-7081, 81-7081-01. Головними перевагами такого рухомого складу є впровадження на ньому енергозберігаючого обладнання та систем (асинхронного приводу, мікропроцесорної системи управління, систем рекуперації тощо). За результатами аналізу досліджень [1–3] відомо, що впровадження зазначеного обладнання та систем на рухомому складі метрополітену дозволяє скоротити до 40 % електроенергії, що споживається на тягу, а також в цілому зменшити енергоспоживання в метрополітені на 5–8 %.

За аналізом багатьох досліджень відомо, що за існуючої інфраструктури системи енергозабезпечення метрополітену використання електроенергії рекуперації має імовірнісний характер та не перевищує 12 % [4, 5]. Як наслідок, існує проблема реалізації надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування за відсутності споживача в зоні рекуперації.

Одним з ключових питань при впровадженні систем рекуперації на рухомому складі метрополітену є оцінка кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час його реальних умов експлуатації. Актуальність вирішення даного питання обумовлено необхідністю визначення реальної ефективності від застосування зазначених систем на рухомому складі метрополітену. Слід зазначити, що в ряді досліджень як вітчизняних, так і іноземних вчених, проводилась оцінка реальної ефективності від впровадження систем рекуперації на рухомому складі.

В роботах [6, 7] виконано оцінку можливої кількості заощадженої електроенергії для реальних умов експлуатації рухомого складу з реостатним гальмуванням в КП «Дніпропетровський метрополітен»; в роботі [8] – в Московському метрополітені. Зазначені дослідження здійснювались на рухомому складі метрополітену без можливості рекуперації електроенергії до контактної мережі. За результатами цих досліджень встановлено, що в режимі реостатного гальмування утилізується 15–52 % електроенергії, яка витрачається на тягу поїздів.

В роботах [8–12] оцінка виконувалась для рухомого складу метрополітену з встановленими на ньому системами рекуперації. В зазначених дослідженнях оцінка здійснювалась для рухомого складу метрополітену без урахування реальних умов експлуатації (зміни профілю колії, завантаження вагонів, графіку руху тощо). За результатами аналізу дослідження [10] встановлено, що впровадження систем рекуперації на вагонах моделей 81.715, 81.716 в умовах їх експлуатації на одній з ліній Московського метрополітену з максимальним завантаженням вагонів дозволяє заощадити у середньому на рівні 9,4 % електроенергії, яка витрачається на тягу поїз-

дів. Аналіз робіт [9, 11, 12] дозволив встановити, що застосування систем накопичення енергії дозволить додатково зберегти близько 10–20 % електроенергії, що споживається на тягу рухомим складом метрополітену з системами рекуперації.

В роботах іноземних вчених [13–18] цьому питанню також приділяється достатньо уваги і в них детально та повно розглянуто це питання. За результатами аналізу цих досліджень встановлено, що резерви додаткових заощаджень за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування шляхом впровадження накопичувачів енергії складають на рівні 10–30 %. Однак ці дослідження проведені з урахуванням умов експлуатації метрополітенів іноземних країн, тому в них не враховано особливості системи енергозабезпечення вітчизняного метрополітену.

Таким чином, результати досліджень [8–18] не дають змогу оцінити ефективність від впровадження систем рекуперації на рухомому складі в повному обсязі. Зокрема, відсутні дослідження з оцінки ефективності зазначених систем під час зміни штатних умов експлуатації рухомого складу у вітчизняному метрополітені (завантаження вагонів, графіку руху тощо). Отже, питання оцінки кількості надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації для аналізу резервів енергозбереження залишається актуальним.

Мета роботи – дослідження резервів заощадження енергоресурсів в метрополітені за рахунок ефективного використання електроенергії рекуперативного гальмування рухомого складу.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для проведення вищезазначених досліджень в умовах КП «Київський метрополітен» за участю фахівців ПАТ «КВБЗ» та ДП «УкрНДІВ» розроблено експериментальний випробувальний комплекс, блок-схему якого наведено на рис. 1. До складу комплексу входить дослідний п'ятивагонний рухомий склад та вимірювальна система, що встановлена на його борту.

В якості дослідного зразка для дослідження енергопроцесів між контактною мережею та поїздом використовується п'ятивагонний рухомий склад з асинхронним приводом та системою рекуперації, в якому головні вагони безмоторні, проміжні – моторні (комплектация 3М+2Т). Конфігурацію дослідного п'ятивагонного рухомого складу метрополітену з системою рекуперації зображено на рис. 1.

Головні вагони укомплектовані блоками власних потреб (БВП), які з'єднані з струмоприймачами (СП) через автоматичні вимикачі (АВ). Встановлені БВП забезпечують живленням нетягове електрообладнання поїзда. Основними функціями АВ є підключення кола живлення нетягового електрообладнання до контактної мережі та його захист під час виникнення аварійних режимів. Установлені на головних вагонах СП забезпечують споживання електроенергії з мережі на власні потреби.

Рисунок 1 – Блок-схема експериментального випробувального комплексу

Проміжні вагони укомплектовані асинхронними тяговими двигунами (АТД) типу МВ-5149-А на кожній колісній парі з наступними номінальними параметрами: $P_n = 150$ кВт; $U_n = 610$ В; $I_n = 185$ А; $f_n = 65$ Гц; $\eta_n = 0,91$; $n_n = 1900$ об/хв; $s_n = 2,4$ %.

Асинхронні ТД обмоторених вагонів отримують живлення від статичного тягового перетворювача (СТП), який складається з двох інверторів та має блочно-модульну конструкцію. Інвертори забезпечують плавне регулювання вихідної напруги від нуля до максимального значення. Один інвертор забезпечує управління двома АТД. Конструкція інвертора також передбачає рекупераційне гальмування за наявності споживача електроенергії в мережі та реостатне гальмування за допомогою блоків резисторів (БР) за їх відсутності. Силкові тягові перетворювачі з'єднанні з СП через швидкодіючий вимикач (ШВ) та головний вимикач (ГВ).

Вимикачі (ШВ, ГВ) встановлені на кожному проміжному обмотореному вагоні з метою підключення силового електрообладнання (СТП, АТД) до контактної мережі та його захисту під час виникнення аварійних режимів в силовому колі. Встановлені на проміжних обмоторених вагонах СТ забезпечують енергообмін між мережею та вагонами в режимах споживання та рекуперації.

В умовах ДП «УкрНДІВ» розроблено вимірювальну систему для дослідження енергопроцесів між контактною мережею та рухомим складом в реальних умовах його експлуатації.

До складу вимірювальної системи входять: персональний комп'ютер (ПК), аналого-цифровий пе-

ретворювач (АЦП), блок комутації (БК), блок узгодження (БУ) та вимірювальні датчики.

В якості вимірювальних датчиків використовуються одинадцять датчиків струму (ДС1–ДС11), п'ять датчиків напруги (ДН1–ДН5) та датчик швидкості (ДШ). Контроль спожитого струму на власні потреби здійснюється ДС1 та ДС5, контроль загального струму споживання на тягу та рекуперацію виконуються ДС2–ДС4, контроль струму при реостатному гальмуванні відповідно ДС6–ДС11. Контроль напруги контактної мережі здійснюється за допомогою ДН1 та ДН2, контроль напруги на гальмівних резисторах відповідно ДН3–ДН5. Вимірювання швидкості поїзда здійснюється за допомогою ДШ.

Для узгодження типу та рівня вихідного сигналу ДШ з вхідним каналом АЦП використовується БУ. Сигнали з виходів вимірювальних датчиків через БК надходять на вхідні канали АЦП, який виконує функцію перетворення аналогових сигналів в цифрову форму для подальшої обробки на ПК.

Обробка даних на ПК здійснюється за допомогою атестованого програмного забезпечення «ЕЛЕКТРО» розробленого спеціалістами ДП «УкрНДІВ» [19]. Вимірювальна система передбачає отримання, відображення та збереження даних, отриманих від вимірювальних датчиків, які встановлені на дослідному рухомому складі. Слід зазначити, що дана система є універсальною, оскільки може застосовуватись для дослідження енергопроцесів практично на всіх типах електрорухомого складу.

Таким чином, розроблено експериментальний випробувальний комплекс для дослідження енерго-

обмінних процесів між контактною мережею та рухомим складом метрополітену з системами рекуперації.

З використанням розробленого комплексу для визначення резервів заощадження енергоресурсів виконано дослідження енергообмінних процесів на Святошинсько-Броварській лінії комунального підприємства «Київський метрополітен», а саме на перегонах «Шулявська–Берестейська–Шулявська», «Хрещатик–Театральна–Хрещатик».

Перегін «Шулявська–Берестейська» має затяжний підйом 42 %, перегін «Берестейська–Шулявська» – затяжний спуск 42 %. Довжина перегонів «Шулявська–Берестейська» та «Берестейська–Шулявська» складає 2240 м, при цьому довжина ділянки колії з ухилом – 1772 м. На перегонах «Хрещатик–Театральна» та «Театральна–Хрещатик» наявні криві малого радіусу ($R_1=400$ м довжиною 169 м; $R_2=400$ м довжиною 324 м), максимальний ухил на цих перегонах складає 3 %, довжина перегонів незначна – 766 м. Таким чином, дослідження виконано для різних умов експлуатації дослідного рухомого складу, на відносно рівній ділянці колії та ділянці із затяжним ухилом 42 %.

Дослідження проведено за умов не менше ніж 15 проїздів дослідного рухомого складу в прямому та зворотному напрямках на кожному з перегонів. Дослідження виконано з дотриманням «непідковоного» графіку руху під час номінального завантаження вагонів. При цьому в процесі досліджень додатково фіксувався час руху поїзда (T_x) на зазначених перегонах. За допомогою вимірювальної системи під час кожного з проїздів зареєстровано осцилограми напруги контактної мережі (на струмоприймачі), струму та швидкості руху поїзда, напруги на гальмівних резисторах та струму, який розсіюю у вигляді теплоти на гальмівних резисторах. Таким чином, за допомогою вимірювальної системи було зафіксовано з частотою дискретизації 2,5 кГц напругу на струмоприймачі $u(t)$, струм поїзда в режимах тяги та рекуперативного гальмування $i(t)$; напругу на гальмівних резисторах $u_R(t)$, струм на гальмівних резисторах $i_R(t)$, швидкість руху поїзда $v(t)$, а також час руху поїзда на перегоні (T_x).

За результатами обробки масивів даних (осцилограм), що отримані під час типових штатних умов експлуатації рухомого складу з системами рекуперації визначено наступні показники: середні значення напруги контактної мережі в режимах тяги і рекуперативного гальмування ($U_{сер.тяги}$, $U_{сер.рек.}$); середнє значення струму в режимах тяги поїзда ($I_{сер.тяги}$); середнє значення струму, що генерується поїздом до контактної мережі під час рекуперативного гальмування ($I_{сер.рек.}$); середнє значення напруги на гальмівних резисторах ($U_{сер.R}$); середнє значення струму, що розсіюється у вигляді теплоти на гальмівних резис-

торах в режимі рекуперативного гальмування ($I_{сер.R}$); час руху в режимах тяги та рекуперативного гальмування ($t_{тяги}$, $t_{рек.}$), а також середню експлуатаційну швидкість на перегоні ($V_{сер.екс.}$).

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

Кількість електроенергії, що споживається в режимах тяги, розраховується за формулою [6, 7, 20]:

$$A_{тяги} = \frac{U_{сер.тяги} I_{сер.тяги} t_{тяги}}{3600 \cdot 1000}. \quad (1)$$

Кількість електроенергії, що генерується до контактної мережі, розраховується за формулою [3]:

$$A_{рек.} = \frac{U_{сер.рек.} I_{сер.рек.} t_{рек.}}{3600 \cdot 1000}. \quad (2)$$

Кількість електроенергії, що виділяється у вигляді теплоти на гальмівних резисторах (надлишкової енергії), розраховується за формулою [3, 20]:

$$A_R = \frac{U_{сер.R} I_{сер.R} t_{рек.}}{3600 \cdot 1000}. \quad (3)$$

Коефіцієнт рекуперації визначається за відношенням згенерованої електроенергії до контактної мережі під час рекуперативного гальмування до спожитої електроенергії в режимі тяги [6]:

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

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

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

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

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

Результати розрахунків, виконаних за формулами (1)–(6) для перегонів «Шулявська–Берестейська», «Берестейська–Шулявська», «Хрещатик–Театральна», «Театральна–Хрещатик», зображено у вигляді графіків та діаграм на рис. 2–5.

а)

б)

в)

г)

Рисунок 2 – Графіки кількості проїздів перегону в заданих інтервалах часу (а), кількості електроенергії від часу руху на перегоні (б), діаграми кількості електроенергії (в) та відношення кількості електроенергії (г) під час кожного проїзду перегону «Хрещатик–Театральна»

а)

б)

в)

г)

Рисунок 3 – Графіки кількості проїздів перегону в заданих інтервалах часу (а), кількості електроенергії від часу руху на перегоні (б), діаграми кількості електроенергії (в) та відношення кількості електроенергії (г) під час кожного проїзду перегону «Театральна–Хрещатик»

а)

б)

в)

г)

Рисунок 4 – Графіки кількості проїздів перегону в заданих інтервалах часу (а), кількості електроенергії від часу руху на перегоні (б), діаграми кількості електроенергії (в) та відношення кількості електроенергії (г) під час кожного проїзду перегону «Шулявська–Берестейська»

а)

б)

в)

г)

Рисунок 5 – Графіки кількості проїздів перегону в заданих інтервалах часу (а), кількості електроенергії від часу руху на перегоні (б), діаграми кількості електроенергії (в) та відношення кількості електроенергії (г) під час кожного проїзду перегону «Берестейська–Шулявська»

Додатково аналіз резервів енергозбереження виконувався комплексно під час руху дослідного складу в прямому та зворотному напрямках, тобто для перегонів «Шулявська–Берестейська–Шулявська» та «Хрещатик–Театральна–Хрещатик». При цьому кількість спожитої, рекуперованої до контактної мережі та надлишкової електроенергії для зазначених перегонів визначено за формулами:

$$A_{\text{тяги}\Sigma} = A_{\text{тяги}(pr)} + A_{\text{тяги}(zv)}; \quad (7)$$

$$A_{\text{рек}\Sigma} = A_{\text{рек}(pr)} + A_{\text{рек}(zv)}; \quad (8)$$

$$A_{R\Sigma} = A_{R(pr)} + A_{R(zv)}. \quad (9)$$

де $A_{\text{тяги}(pr)}$, $A_{\text{рек}(pr)}$, $A_{R(pr)}$, $A_{\text{тяги}(zv)}$, $A_{\text{рек}(zv)}$, $A_{R(zv)}$ – кількість спожитої, рекуперованої до контактної мережі та надлишкової електроенергії під час руху поїзда на перегоні в прямому та зворотному напрямках відповідно.

Коефіцієнт рекуперації і коефіцієнти, які показують кількість невикористаної (надлишкової) електроенергії під час рекуперативного гальмування та резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування визначено за формулами:

$$k_{\text{рек}\Sigma} = \frac{A_{\text{рек}\Sigma}}{A_{\text{тяги}\Sigma}}; \quad (10)$$

$$k_{R\Sigma} = \frac{A_{R\Sigma}}{(A_{\text{рек}\Sigma} + A_{R\Sigma})}; \quad (11)$$

$$k_{r\Sigma} = \frac{A_{R\Sigma}}{A_{\text{тяги}\Sigma}}. \quad (12)$$

Результати розрахунків, виконаних за формулами (7)–(12), зображено у вигляді діаграм на рис. 6, 7.

Рисунок 6 – Діаграми кількості спожитої, рекуперованої до контактної мережі, виділеної у вигляді теплової на гальмівних резисторах електроенергії (а) та відношення кількості електроенергії (б) під час проїздів на перегонах «Хрещатик–Театральна–Хрещатик»

Рисунок 7 – Діаграми кількості спожитої, рекуперованої до контактної мережі, виділеної у вигляді теплової на гальмівних резисторах електроенергії (а) та відношення кількості електроенергії (б) під час проїздів на перегонах «Шулявська–Берестейська–Шулявська»

Виконаний аналіз результатів досліджень резервів енергозбереження для заданих штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації дозволив встановити наступне:

– показники часу руху поїзда на перегоні, кількості спожитої та рекуперованої до контактної ме-

режі електроенергії завдяки особливості режимів керування поїздом машиністами мають значний розкид значень та змінюються в широких межах, що свідчить про необхідність більш точного керування та підвищення енергоефективності перевізного процесу в метрополітені (рис. 2–5);

– максимальна кількість спожитої електроенергії ($A_{тяги}$) спостерігається на перегоні з затяжним підйомом 42 % «Шулявська–Берестейська», мінімальна – на перегоні з затяжним спуском 42 % «Берестейська–Шулявська» (рис. 2–5);

– найбільшу кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі ($A_{рек}$) та надлишкової електроенергії (A_R) зафіксовано на перегоні з затяжним спуском 42 % «Берестейська–Шулявська» (рис. 5);

– під час експлуатації поїзда на перегоні «Хрещатик–Театральна» кількість спожитої електроенергії на тягу змінюється в межах (5,5–14,3) кВт·год, кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі – в межах (1,7–5,7) кВт·год, кількість надлишкової електроенергії, що розсіюється на резисторах у вигляді теплоти – в межах (0,8–6,0) кВт·год, коефіцієнт рекуперації – в межах (0,14–0,56), коефіцієнт, який показує кількість невикористаної електроенергії за відношенням до загальної кількості рекуперованої енергії – в межах (0,2–0,76), коефіцієнт, який показує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування – в межах (0,09–0,43) (рис. 2);

– під час експлуатації поїзда на перегоні «Театральна–Хрещатик» кількість спожитої електроенергії на тягу змінюється в межах (6,7–15,5) кВт·год, кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі – в межах (0,5–2,7) кВт·год, кількість надлишкової електроенергії, що розсіюється на резисторах у вигляді теплоти – в межах (0,2–5,0) кВт·год, коефіцієнт рекуперації – в межах (0,04–0,25), коефіцієнт, який показує кількість невикористаної електроенергії за відношенням до загальної кількості рекуперованої енергії – в межах (0,18–0,88), коефіцієнт, який показує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування – в межах (0,03–0,36) (рис. 3);

– під час експлуатації поїзда на перегоні «Шулявська–Берестейська» кількість спожитої електроенергії на тягу змінюється в межах (77,6–84,2) кВт·год, кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі – в межах (0,3–4,9) кВт·год, кількість надлишкової електроенергії, що розсіюється на резисторах у вигляді теплоти – в межах (0,3–2,8) кВт·год, коефіцієнт рекуперації – в межах (0–0,06), коефіцієнт, який показує кількість невикористаної електроенергії за відношенням до загальної кількості рекуперованої енергії – в межах (0,07–0,76), коефіцієнт, який показує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування – в межах (0–0,03) (рис. 4);

– під час експлуатації поїзда на перегоні «Берестейська–Шулявська» кількість спожитої електроенергії на тягу змінюється в межах (1,5–9,6) кВт·год, кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі – в межах (13,1–27,7) кВт·год, кількість надлишкової електроенергії, що розсіюється на резисторах у вигляді теплоти – в межах (14,1–32,2) кВт·год, коефіцієнт рекуперації – в межах (2,29–15,25), коефіцієнт,

який показує кількість невикористаної електроенергії за відношенням до загальної кількості рекуперованої енергії – в межах (0,34–0,71), коефіцієнт, який показує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування – в межах (2,18–13,8) (рис. 5);

– під час експлуатації поїзда в прямому та зворотному напрямках на перегонах «Хрещатик–Театральна–Хрещатик» кількість спожитої електроенергії на тягу змінюється в межах (16,3–25,6) кВт·год, кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі – в межах (3,2–7,2) кВт·год, кількість надлишкової електроенергії, що розсіюється на резисторах у вигляді теплоти – в межах (1,5–8,3) кВт·год, коефіцієнт рекуперації – в межах (0,14–0,31), коефіцієнт, який показує кількість невикористаної електроенергії за відношенням до загальної кількості рекуперованої енергії – в межах (0,24–0,72), коефіцієнт, який показує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування – в межах (0,09–0,36) (рис. 6);

– під час експлуатації поїзда в прямому та зворотному напрямках на перегонах «Шулявська–Берестейська–Шулявська» кількість спожитої електроенергії на тягу змінюється в межах (80,4–89,8) кВт·год, кількість рекуперованої електроенергії до контактної мережі – в межах (16,7–31,1) кВт·год, кількість надлишкової електроенергії, що розсіюється на резисторах у вигляді теплоти – в межах (14,8–32,9) кВт·год, коефіцієнт рекуперації – в межах (0,19–0,38), коефіцієнт, який показує кількість невикористаної електроенергії за відношенням до загальної кількості рекуперованої енергії – в межах (0,32–0,66), коефіцієнт, який показує резерви невикористаної (надлишкової) електроенергії рекуперативного гальмування – в межах (0,18–0,38) (рис. 7);

– впровадження систем рекуперації на рухомому складі метрополітену залежно від перегонів дозволяє повернути в мережу на рівні 14–38 % електроенергії, що споживається на тягу, а також існують резерви додаткових заощаджень на рівні 9–38 % від кількості спожитої на тягу електроенергії (рис. 6, 7).

У цій роботі також додатково виконано дослідження з визначення впливу різних факторів на кількість електроенергії, яка споживається на тягу ($A_{тяги}$) та виділяється під час рекуперативного гальмування ($A=A_{рек}+A_R$). З аналізу досліджень [3, 7, 8, 10–12, 21] відомо, що на кількість спожитої та рекуперованої електроенергії в основному впливають такі фактори, як профіль колії, графік руху (експлуатаційна швидкість), завантаженість вагонів. У цій роботі запропоновано з поміж перелічених основних факторів впливу визначати найбільш значущий за методом планування експерименту.

Метод планування експерименту застосовано для побудови математичної моделі у вигляді регресійного рівняння, яке визначає вплив кожного фактору за допомогою коефіцієнтів регресії і встановлює взає-

мозв'язки між ними, а також дозволяє визначати найбільш значущий фактор. Дослідження за методом планування експерименту передбачає наступні етапи: встановлення значущих факторів, побудова матриці експерименту, проведення дослідів, обчислення дисперсії, перевірка адекватності дисперсій, визначення коефіцієнтів регресії і власне отримання рівнянь регресії. Як значущі фактори експерименту прийнято: профіль колії – x_1 ; графік руху (експлуатаційна швидкість) – x_2 ; завантаження поїзда – x_3 . Під час проведення експерименту обрано два рівні зміни параметрів: профіль колії з наявністю «шкідливих» ухилів (+) та відносно рівні площадки (–), «непіковий» (+) та «піковий» (–) графіки руху, а також номінальне (+) та максимальне (–) завантаження вагонів. Відповідно до цього будується матриця експерименту для заданих умов:

$$M = p^q = 2^3 = 8, \quad (13)$$

де p – кількість рівнів зміни параметрів; q – кількість значущих факторів.

Дисперсія в кожному досліді обчислюється за виразом [22, 23]:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (y_n - \bar{y})^2}{k - 1}, \quad (14)$$

де k – кількість повторень у досліді; n – порядковий номер досліді; $\bar{y}$ – середнє значення контролюва-

ного параметра.

Перевірка гіпотези щодо однорідності дисперсій здійснюється за критерієм Кохрена [22, 23]:

$$G_{\max} = \frac{S_{\max}^2}{\sum S^2}. \quad (15)$$

Визначається табличне значення критерію Кохрена залежно від числа ступенів свободи ($G_{\text{табл}}$). Якщо $G_{\max} < G_{\text{табл}}$, то експеримент виконаний зі статично однаковою точністю і далі можна визначати коефіцієнти рівняння регресії.

Матрицю експерименту для заданих умов, зображено у табл. 1–2. В якості ділянки з наявним «шкідливим» ухилом обрано – «Шулявська–Берестейська–Шулявська», в якості ділянки з відносно рівною площадкою – «Хрещатик–Театральна–Хрещатик».

Вільний член рівняння регресії визначається як:

$$a_0 = \frac{\sum_{i=1}^M y_i}{M}, \quad (16)$$

де y_i – вихідні параметри для i -го впливу.

Коефіцієнти регресії, що характеризують вплив факторів визначаються за виразом [22, 23]:

$$a_{i,j} = \frac{\sum_{i,j=1}^M x_{iq} x_{jq} \bar{y}_i}{M}. \quad (17)$$

Таблиця 1 – Матриця експерименту для показника кількості спожитої електроенергії на тягу

Досліджувана ділянка	x_1	x_2	x_3	А _{тяги} , кВт·год				S^2
				y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$	
«Шулявська–Берестейська–Шулявська»	+	+	+	82,82	82,26	83,42	82,83	0,67
«Шулявська–Берестейська–Шулявська»	+	+	–	86,62	87,09	86,31	86,67	0,31
«Шулявська–Берестейська–Шулявська»	+	–	–	89,56	88,53	90,5	89,53	1,94
«Хрещатик–Театральна–Хрещатик»	–	–	–	26,47	27,69	28,35	27,5	1,82
«Хрещатик–Театральна–Хрещатик»	–	+	+	17,31	17,11	16,46	16,96	0,4
«Шулявська–Берестейська–Шулявська»	+	–	+	86,52	87,49	88,38	87,46	1,73
«Хрещатик–Театральна–Хрещатик»	–	–	+	20,99	21,09	20,64	20,91	0,11
«Хрещатик–Театральна–Хрещатик»	–	+	–	20,01	19,98	21,09	20,36	0,8
Σ								7,78
$G_{\max}$								0,25

Примітка. При числі ступенів свободи $f_1=k-1=2$; $f_2=M-8$ табличне значення критерію Кохрена дорівнює 0,63

Таблиця 2 – Матриця експерименту для показника кількості електроенергії, яка виділяється під час рекуперативного гальмування

Досліджувана ділянка	x_1	x_2	x_3	А, кВт·год				S^2
				y_1	y_2	y_3	$\bar{y}$	
«Шулявська–Берестейська–Шулявська»	+	+	+	49,95	48,69	50,43	49,69	1,62
«Шулявська–Берестейська–Шулявська»	+	+	–	48,65	50,99	48,36	49,33	4,16
«Шулявська–Берестейська–Шулявська»	+	–	–	48,9	49,39	49,26	49,18	0,13
«Хрещатик–Театральна–Хрещатик»	–	–	–	11,79	12,95	13,75	12,83	1,94
«Хрещатик–Театральна–Хрещатик»	–	+	+	6,21	6,67	6,14	6,34	0,17
«Шулявська–Берестейська–Шулявська»	+	–	+	51,07	50,72	50,42	50,74	0,21
«Хрещатик–Театральна–Хрещатик»	–	–	+	7,73	8,17	6,93	7,61	0,79
«Хрещатик–Театральна–Хрещатик»	–	+	–	8,29	9,00	9,11	8,80	0,40
Σ								9,41
$G_{\max}$								0,44

Примітка. При числі ступенів свободи $f_1=k-1=2$; $f_2=M-8$ табличне значення критерію Кохрена дорівнює 0,63

Регресійне рівняння з урахуванням заданих факторів впливу має наступний загальний вигляд [22]:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{23}x_2x_3 + a_{123}x_1x_2x_3. \quad (18)$$

Результати розрахунку для заданих умов експлуатації поїзда вищезазначеним методом, виконані за виразами (16)–(18), приведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати досліджень методом планування експерименту

$A_{тяги}$, кВт·год		A , кВт·год	
Регресійне рівняння	Найбільш вагомий фактор	Регресійне рівняння	Найбільш вагомий фактор
$54,0+32,6x_1-2,3x_2-2,0x_3+0,5x_1x_2+0,5x_1x_3+0,2x_2x_3-0,6x_1x_2x_3$	x_1	$29,3+20,4x_1-0,8x_2-0,7x_3+0,6x_1x_2+1,2x_1x_3+0,2x_2x_3-0,5x_1x_2x_3$	x_1

За результатами досліджень методом планування експерименту отримано математичні моделі визначення кількості електроенергії, що споживається на тягу та виділяється під час рекуперативного гальмування для заданих умов експлуатації. За аналізом цих досліджень визначено, що найбільш значущим фактором впливу на кількість електроенергії, що споживається на тягу та виділяється під час рекуперативного гальмування, є профіль колії (фактор впливу є явно вираженим).

ВИСНОВКИ. 1. Розроблено експериментальний випробувальний комплекс для дослідження енергообмінних процесів між контактною мережею та рухомих складом метрополітену з системами рекуперації.

2. Аналіз результатів розрахунково-експериментальних досліджень під час заданих штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації на перегонах «Хрещатик–Театральна–Хрещатик», «Шулявська–Берестейська–Шулявська» Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен» показав наступне:

– впровадження систем рекуперації на рухомих складі дозволяє повернути в контактну мережу на рівні 14–38 % електроенергії, що споживається на тягу;

– існують резерви підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену з системами рекуперації за рахунок ефективного використання надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування на рівні 9–38 %, що споживається на тягу.

3. За методом планування експерименту визначено, що найбільш значущим фактором впливу на кількість електроенергії, яка споживається з контактної мережі та виділяється під час рекуперативного гальмування, є профіль колії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Комунальне підприємство «Київський метрополітен» (офіційний сайт). URL: <http://www.metro.kiev.ua>.
2. Метрополітени України. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/>
3. Донченко А. В., Мужичук С. О., Сулим А. О., Хозя П. О., Мельник О. О. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ». *Збірник наукових праць*

«Рейковий рухомий склад». Кременчук. 2015. Вип. 12. С. 48–56.

4. Васильев В. А. Анализ возможности применения емкостных накопителей энергии. *Известия ПГУПС*. СПб. 2011. № 1. С. 35–44.

5. Саблин О. И. Проблемы использования избыточной энергии рекуперации в системе электрической тяги. *Электромагнитна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2013. № 6. С. 32–35.

6. Кузнецов В. Г., Саблин О. И., Губский П. В., Колыхаев Е. Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена. *Гірнична електромеханіка та автоматика : наук.-техн. зб. Нац. гірничого ун-ту*. 2015. № 95. С. 68–73.

7. Саблін О. І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Вип. 8 (72). Т. 6. С. 9–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30483.

8. Шевлюгин М. В., Желтов К. С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии. *НТТ – Наука и техника транспорта*. 2008. Вып. 1. С. 15–20.

9. Бычкова М. П. Энергосбережение в метро. *Транспорт Российской Федерации. Специальный выпуск «Наука и транспорт. Метрополитены будущего»*. 2010. С. 67.

10. Гаврилов Я. И., Мнацканов В. А. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями. Москва : Транспорт, 1986. 229 с.

11. Донченко А. В., Сулим А. О., Сіора О. С. и др. Аналіз питань енергозбереження та енергоефективності під час експлуатації рухомого складу метрополітену. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпр. нац. ун-ту залізничного трансп.* 2016. № 3 (63). С. 108–119.

12. Сулим А. А., Сычев С. Д., Распопин В. Р. и др. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена. *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 28–29 березня 2012*. Кременчук : КрНУ ім. М. Остроградського. 2012. С. 344.

13. 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. P. 13–29. DOI: 10.1016/j.trc.2015.05.002.

14. Khodaparastan M., Ahmad A. Mohamed, Brandauer W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*. 2019, P. 1–17.

15. Iannuzzi D., Pagano E., Tricoli P. The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines. *Energies*. 2013. № 6. P. 1802–1820. DOI: 10.3390/en6041802.

16. Shimada M., Oishi R., Araki D. Energy storage system for effective use of regenerative energy in electrified railways. *Hitachi Review*. 2010. № 59 (1). P. 33–38.

17. Lee H., Song J., Lee H. A., Jang G., Kim G. Capacity optimization of the supercapacitor energy storage on DC railway system using a railway power flow algorithm. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. 2011. Vol. 7. № 5(B). P. 2739–2753.

18. Szênâsy I. New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. *Acta*

Technica Jaurinensis. 2009. Vol. 2. № 1. P. 117–131.

19. Свідомство про реєстрацію авторського права на твір № 16669. Програмний комплекс для збору, відображення, запису та подальшої математичної обробки даних з аналого-цифрових перетворювачів у комп'ютеризованих вимірювальних комплексах («ЕЛЕКТРО»). Автор Сичов С.Д., авторські майнові права належать Сичов С.Д., ДП «УкрНДІВ», дата реєстрації 19.05.2006.

20. Слепцов М. А., Долаберидзе Г. П., Прокопович А. В. и др. Основы электрического транспорта: учебник для студ. высш. учеб. заведений. Москва : Издательский центр «Академия», 2006. 464 с.

21. Сиченко В. Г., Кузнецов В. Г., Босий Д. О., Саблін О. І. Енергетика тягових мереж : монографія ; за заг. ред. д-ра техн. наук, проф. В. Г. Сиченка. Дніпро : Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. 210 с.

22. Говорин Е. В. Статистические методы планирования эксперимента в металлургии. Москва : Металлургия, 1992. 350 с.

23. Пальоха К. К. Організація і проведення експерименту : навч. посібник для студентів спеціальності «Композиційні та порошкові матеріали, покриття». Київ : ІЗІН, 1996. 136 с.

ESTIMATION OF ENERGY SAVING RESERVES UNDER NORMAL OPERATING CONDITIONS OF METRO ROLLING STOCK WITH REGENERATIVE ENERGY SYSTEMS

A. Sulim, E. Tretiak, P. Hozia, O. Melnyk

State Enterprise “Ukrainian Scientific Railway Car Building Research Institute”

vul. I. Pryhodko, 33, Kremenchuk, 39621, Ukraine. E-mail: sulim1.ua@gmail.com

S. Muzychuk

Public Joint Stock Company “Kryukovsky Railway Car Building Works”

vul. I. Pryhodko, 139, Kremenchuk, 39621, Ukraine. E-mail: zgk_metro@kvsz.com

Purpose. The article deals with the estimation of energy saving reserves in the metro at two experimental sections of the Sviatoshyn-Brovary line of the KP “Kyiv Metro” (a relatively level track section at the Khreshchatyk-Teatralna-Khreshchatyk crossing and a section with a sustained slope of 42 ‰ at the Shuliavska-Beresteiska-Shuliavska crossing) provided by the efficient use of regenerative braking energy of the rolling stock. **Methodology.** An experimental test facility was developed to investigate the energy exchange processes between the overhead line and the metro rolling stock with regenerative systems. Energy saving reserves were determined based on the results of the experimental research for the specified sections under given operating conditions. **Results.** It is established that under the actual operating conditions many factors influence the total amount of electrical energy consumed from the overhead wire and released during the regenerative braking of the rolling stock. The main influence factors are the track profile on the section, the traffic schedule (operational speed), car loads. **Practical value.** Due to the use of the experiment planning method it was determined that the most significant factor which effected the amount of electricity consumed from the overhead line and released during regenerative braking is the track profile. Figures 7, tables 3, references 23.

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

REFERENCES

1. Komunalne pidpriemstvo «Kiivs'kij metro-politen» [Kyiv Metro Underground Public Utility]. Retrieved from <http://www.metro.kiev.ua> [in Ukrainian]

2. Metropolitani Ukraini [Subways of Ukraine]. Retrieved from <https://uk.wikipedia.org/wiki> [in Ukrainian]

3. Donchenko, A. V., Muzhichuk, S. O., Sulim, A. O., Hozia, P. O. & Melnyk, O. O. (2015). Doslidzhennya energoefektivnosti modernizovanogo poizda metropolitenu virobniatva PAT «KVBZ». *Zbirnik naukovih prac «Rejkovij ruhomij sklad»*, 12,

48–56. [in Ukrainian]

4. Vasil'ev, V. A. (2011). Analiz vozmozhnosti primeneniya emkostnyh nakopitelej energii. *Izvestiya PGUPS*, 1, 35–44. [in Russian]

5. Sablin, O. I. (2013). Problemy ispolzovaniya izbytochnoj energii rekuperacii v sisteme elektricheskoy tyagi. *Elektromagnitna sumisnist ta bezpeka na zaliznichnomu transporti*, 6, 32–35. [in Russian]

6. Kuznecov, V. G., Sablin, O. I., Gubskij, P. V. & Kolyhaev, E. G. (2015). Analiz rezervov energosbere-

zheniya pri vnedrenii sistemy rekuperacii energii na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitena. *Girnichia elektromekhanika ta avtomatika: nauk.-tekhn. zb. Nac. girnichogo un-tu*. D, 95, 68–73. [in Russian]

7. Sablin, O. I. (2014). Doslidzhennya efektyvnosti procesu rekuperacii elektroenergii v umovah metropolitenu. *Vostochno-Evropejskij zhurnal pere-dovyh tekhnologij*, 8 (72), 9–13. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.30483. [in Ukrainian]

8. Shevlyugin, M. V. & Zheltov, K. S. (2008). Snizhenie raskhoda elektroenergii na dvizhenie poezdov v Moskovskom metropolitene pri ispol'zovanii emkostnyh nakopitelej energii. *NTT – Nauka i tekhnika transporta*, 1, 15–20. [in Russian]

9. Bychkova, M. P. (2010). Energoberezhenie v metro. *Transport Rossijskoj Federacii. Special'nyj vypusk «Nauka i transport. Metropoliteny budushchego*, 67. [in Russian]

10. Gavrilov, Ya. I. & Mnacakanov, V. A. (1986). Vagony metropolitena s impulsnymi preobrazovatelyami [Subway cars with pulse converters]. Moscow: Transport. [in Russian]

11. Donchenko, A. V., Sulim, A. O., & Siora, O. S. et al. (2016). Analiz pitan' energoberezhennya ta energoefektyvnosti pid chas ekspluatacii ruhomogo skladu metropolitenu. *Nauka ta progres transportu. Visnik Dnipro. nac. un-tu zalizничного transp*, 3 (63), 108–119. [in Ukrainian]

12. Sulim, A. A., Sychev, S. D., & Raspopin, V. R. et al. (2012). Ekonomiya elektroenergii pri ispol'zovanii rekuperativnogo tormozheniya na vagonah metropolitena. *Elektromekhanichni ta energetichni sistemi, metodi modelyuvannya ta optimizacii. Zbirnik naukovih prac X Mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferencii molodih uchenih i specialistiv u misti Kremen-chuk 28–29 bereznya 2012*. Kremen-chuk: KrNU im. M. Ostrogradskogo, 344. [in Russian]

13. Yang, X., Chen, A., Li, X., Ning, B. & Tang, T. (2015). An energyefficient scheduling approach to improve the utilization of regenerative energy for metro systems. *Transportation Research Part C. Emerging Technologies*, 57, 13–29. DOI:10.1016/j.trc.2015.05.002.

14. Khodaparastan, M., Mohamed, A. & Brandauer, W. (2019). Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems*, 1–17.

15. Iannuzzi, D., Pagano, E. & Tricoli, P. (2013). The use of energy storage systems for supporting the voltage needs of urban and suburban railway contact lines. *Energies*, 6, 1802–182. DOI: 10.3390/en6041802.

16. Shimada, M., Oishi, R. & Araki, D. (2010). Energy storage system for effective use of regenerative energy in electrified railways. *Hitachi Review*, 59 (1), 33–38.

17. Lee, H., Song, J., Lee, H.A., Jang, G. & Kim, G. (2011). Capacity optimization of the supercapacitor energy storage on DC railway system using a railway power flow algorithm. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 7, 5 (B), 2739–2753.

18. Szénási, I. (2009). New energy management of capacitive energy storage in metro railcar by simulation. *Acta Technica Jaurinensis*, 2 (1), 117–131.

19. Sichov S. D. (2006). Programnij kompleks dlya zboru, vidobrazhennya, zapisu ta podal'shoi matematichnoi obrobki danih z analogo-cifrovih peretvoryuvachiv u komp'yuterizovanih vimiryuval'nih kompleksah («ELEKTRO»). *Svidoctvo pro reestraciju avtors'kogo prava na tvir*, № 16669. [in Ukrainian]

20. Slepcev, M. A., Dolaberidze, G. P., & Prokopovich, A. V. et al. (2006). Osnovy elektricheskogo transporta: uchebnik dlya stud vyssh. ucheb. zavedenij [The basics of electric transport: a textbook for university students]. Moscow: Izdatel'skij centr «Akademiya». [in Russian]

21. Sichenko, V. G., Kuznecov, V. G., Bosij, D. O. & Sablin, O. I. (2017). Energetika tyagovih merezh: monografiya [Power engineering of traction networks: monograph]. Dnipro: Vid-vo PF «Standart-Servis». [in Ukrainian]

22. Govorin, E. V. (1992). Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v metallurgii [Statistical methods for designing an experiment in metallurgy]. Moscow: Metallurgiya. [in Russian]

23. Pal'oha, K. K. (1996). Organizaciya i provedennya eksperimentu: Navch. posibnik dlya studentiv special'nosti «Kompozicijni ta poroshkovi materiali, pokrittya» [Organization and conduct of the experiment: Educ. manual for students of the specialty "Composite and powder materials, coatings"]. Kyiv: IZIN. [in Ukrainian]

Стаття надійшла 08.10.2019.