

УДК 621.3/629.4:620.9

А. А. Сулим, к.т.н.

(старший науковий співробітник ДП «Український науково-дослідний інститут вагобудування» (ДП «УкрНДІВ»), м. Кременчук)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА МЕТРОПОЛИТЕНА С СИСТЕМАМИ РЕКУПЕРАЦИИ И НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

В статье рассмотрена одна из основных и актуальных на сегодняшний день проблем – энергосбережение на подвижном составе метрополитена. Из предыдущих исследований установлено, что перспективными направлениями по снижению потребляемой электроэнергии на тягу является применение систем рекуперации и накопителей энергии на подвижном составе. Целью данной статьи является исследование энергообменных процессов для определения количества потребляемой и рекуперированной электроэнергии при размещении накопителей различной энергоемкости. Выполнены экспериментальные исследования энергообменных процессов для заданного режима ведения подвижного состава с системами рекуперации. На основании ранее предложенной процедуры, проведены исследования при размещении на подвижном составе накопителей различной энергоемкости, по результатам которых определено количество потребляемой, рекуперированной в накопитель, а также избыточной электроэнергии при заданных условиях его ведения. Установлено, что размещение накопителей с рабочей энергоемкостью 5; 10; 44,4 кВт·час позволит уменьшить количество потребляемой электроэнергии из контактной сети соответственно на 24,0; 29,5; 36,5 %. Дальнейшие исследования должны быть направлены на определение рациональной энергоемкости накопителей, размещаемых на подвижном составе метрополитена с системами рекуперации, при его заданном режиме ведения на конкретной линии.

Ключевые слова: подвижной состав метрополитена, система рекуперации, накопитель энергии.

У статті розглянута одна з основних і актуальних на сьогоднішній день проблем – енергозбереження на рухомому складі. З попередніх досліджень встановлено, що перспективними напрямками зі зниження споживання електроенергії на тягу є застосування систем рекуперації та накопичувачів енергії на рухомому складі. Метою даної статті є дослідження енергообмінних процесів для визначення кількості спожитої та рекуперованої електроенергії при розміщенні накопичувачів різної енергоємності на рухо-

© Сулим А. А., 2016

мому складі. Виконано експериментальні дослідження енергообмінних процесів для заданого режиму ведення рухомого складу з системами рекуперації. На основі раніше запропонованої процедури, проведені дослідження при розміщенні на рухомому складі накопичувачів різної енергоємності, за результатами яких визначено кількість спожитої, рекуперованої в накопичувач, а також надлишкової електроенергії при заданих умовах його ведення. Встановлено, що розміщення накопичувачів з робочою енергоємністю 5; 10; 44 кВт·год дозволить зменшити кількість спожитої електроенергії з контактної мережі відповідно на 24,0; 29,5; 36,5 %. Подальші дослідження повинні бути спрямовані на визначення раціональної енергоємності накопичувачів, які розміщені на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації, при його заданому режимі ведення на конкретній лінії.

Ключові слова: рухомий склад метрополітену, система рекуперації, накопичувач енергії.

Постановка проблемы. Проблема снижения потерь при преобразовании и потреблении электроэнергии становится стратегическим направлением развития многих отраслей промышленности и секторов экономики, в том числе и метрополитена. Обозначенный тезис подтверждается основными результатами современных научных исследований [1–3] и положениями государственных программ развития метрополитена [4–6].

Отечественный подвижной состав метрополитенов является мощным и энергоемким потребителем электроэнергии. К примеру, количество потребляемой электроэнергии на тягу подвижным составом метрополитена за год КП «Киевский метрополитен» составляет около 150 млн кВт·час [7]. Доля затрат на электроэнергию по отношению к общим затратам состоянием на 2014 год составляет около 7 % [7]. Однако, учитывая поэтапное повышение стоимости энергоресурсов на протяжении 2015–2017 годов [8], ожидается увеличение данного показателя уже в 2017 году на 10 % (затраты на электроэнергию будут составлять около 17 % от общих затрат). Поэтому исследования, направленные на улучшения энергосбережения и повышение энергоэффективности подвижного состава метрополитена, являются своевременными и становятся все более актуальными.

Анализ последних исследований и публикаций. Из предыдущих исследований [9–14] известно, что одним из перспективных способов снижения потребляемой электроэнергии на тягу подвижным составом метрополитена является применение рекуперативного торможения. Данный вид торможения позволяет использовать значительную часть кинетической энергии подвижного состава метрополитена.

В настоящее время в метрополитенах Украины перевозка пассажиров обеспечивается, в основном, поездами с коллекторными двигателями постоянного тока последовательного возбуждения и релейно-контакторными системами управления. С целью сокращения расходов электроэнергии на тягу в последние годы создаются и модернизируются отечественные поезда метрополитена. Главными отличиями этих поездов является использование тягового асинхронного электропривода переменного тока вместо электропривода постоянного тока, микропроцессорной системы управления, а также внедрения другого энергосберегающего оборудования и технологий, прежде всего систем рекуперации.

В публикации [9] отмечается, что эксплуатация данных поездов позволит сократить потребление электроэнергии из сети до 35 %.

Анализ исследований [13–16] показал возможность дополнительного энергосбережения при эксплуатации подвижного состава метрополитена с системами рекуперации за счет эффективного использования электроэнергии торможения путем применения накопителей энергии. Основные типы накопителей и их технические характеристики более подробно описаны в работах [7, 17–19]. Следует отметить, что в данных работах также приведены преимущества и недостатки для каждого типа накопителя. По результатам анализа значительного количества исследований [7, 14, 20] установлено, что значительную перспективу в метрополитене имеют емкостные накопители энергии при их размещении на подвижном составе метрополитена с системами рекуперации.

Одним из важных вопросов при этом является оценка количества потребляемой и рекуперированной электроэнергии при размещении емкостных накопителей энергии (далее – накопителей) заданной энергоемкости на подвижном составе с системой рекуперации в реальных условиях его эксплуатации. В работе [21] предложена процедура исследований, которая позволяет выполнить оценку количества потребляемой, рекуперированной в накопитель, а также электроэнергии, которая отдается в контактную сеть или выделяется в виде теплоты на резисторах при заданном режиме ведения подвижного состава метрополитена и энергоемкости накопителя.

Режим ведения задается в форме матрицы с помощью следующих параметров: среднего потребляемого (рекуперированного) тока, среднего значения напряжения контактной сети, длительностью каждого режима ведения. Следует отметить, что при определении количества электроэнергии предусматривается учет уровня количества накопленной электроэнергии в накопителе на предыдущем режиме ведения поезда и ограниченность накопления заданной энергоемкостью при рекуперативном торможении.

Процедура предусматривает определение исходных данных количества электроэнергии также в форме матрицы. Матрица исходных данных состоит из следующих столбцов: количество потребляемой электроэнергии без применения накопителя – $A_{\text{потр.}}$, количество потребляемой электроэнергии с использованием накопителя – $A_{\text{потр.нак.}}$, количество рекуперированной электроэнергии в накопитель – $A_{\text{нак.рек.}}$, количество электроэнергии, которая отдается в контактную сеть или выделяется в виде теплоты на резисторах (количество избыточной электроэнергии) – $A_{\text{изб.рек.}}$. Количество строк матрицы формирует заданный режим ведения поезда. После заполнения матрицы определяется общее количество потребляемой и рекуперированной электроэнергии для заданного режима ведения подвижного состава с системой рекуперации.

Таким образом, процедура исследований состоит из следующих основных этапов: экспериментальное исследование энергообменных процессов при эксплуатации подвижного состава с системами рекуперации; обработка осциллограмм для задания режима ведения; вычисление количества потребляемой, накопленной и избыточной электроэнергии при размещении на поезде накопителя заданной энергоемкости. Более подробно процедура исследований количества потребляемой и рекуперированной электроэнергии при размещении накопителя заданной энергоемкости на подвижном составе описана в работе [21].

Практический интерес представляют исследования с помощью предложенной процедуры по определению количества сохраняемой электроэнергии за счет использования на подвижном составе метрополитена с системами рекуперации накопителей различной энергоемкости для заданного режима его ведения.

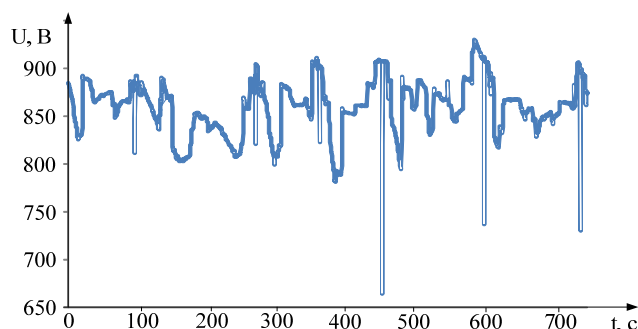
Цель статьи – исследование энергообменных процессов для определения количества потребляемой и рекупируемой электроэнергии при размещении накопителей различной энергоемкости на подвижном составе метрополитена с системами рекуперации.

Основной материал исследований. Экспериментальное исследование энергообменных процессов проведено на Святошинско-Броварской линии КП «Киевский метрополитен» с использованием испытательного комплекса, в состав которого входит подвижной состав метрополитена с системами рекуперации и измерительная система, установленная на его борту. Подвижной состав представляет собой пятивагонный модернизированный поезд производства ПАО «КВСЗ» с асинхронным тяговым приводом, в котором головные вагоны – безмоторные, промежуточные – моторные. Измерительная система разработана специалистами ГП «УкрНИИВ» для исследования энергообменных процессов между контактной сетью и поездом в реальных условиях его эксплуатации. В состав измерительной системы входят: персональный компьютер, аналого-цифровой преобразователь, блок коммутации, блок согласования и измерительные датчики. Обработка данных на персональном компьютере осуществляется с помощью аттестованного программного обеспечения «ЭЛЕКТРО» [22]. Измерительная система предусматривает получение, отображение и сохранение данных, полученных от измерительных датчиков, которые установлены на опытном поезде.

Исследования проводились с максимальной загрузкой вагонов модернизированного поезда при его заданном режиме ведения между конечными станциями «Лесная–Академгородок–Лесная» с соблюдением «непикового» графика движения. Осциллограммы напряжения контактной сети (на токоприемнике), тока и скорости подвижного состава с системой рекуперации при его эксплуатации между станциями «Политехнический институт–Академгородок», приведены на рис. 1.

Аналогичным образом получены осциллограммы на других перегонах при эксплуатации поезда с системой рекуперации между конечными станциями «Лесная–Академгородок–Лесная».

а)



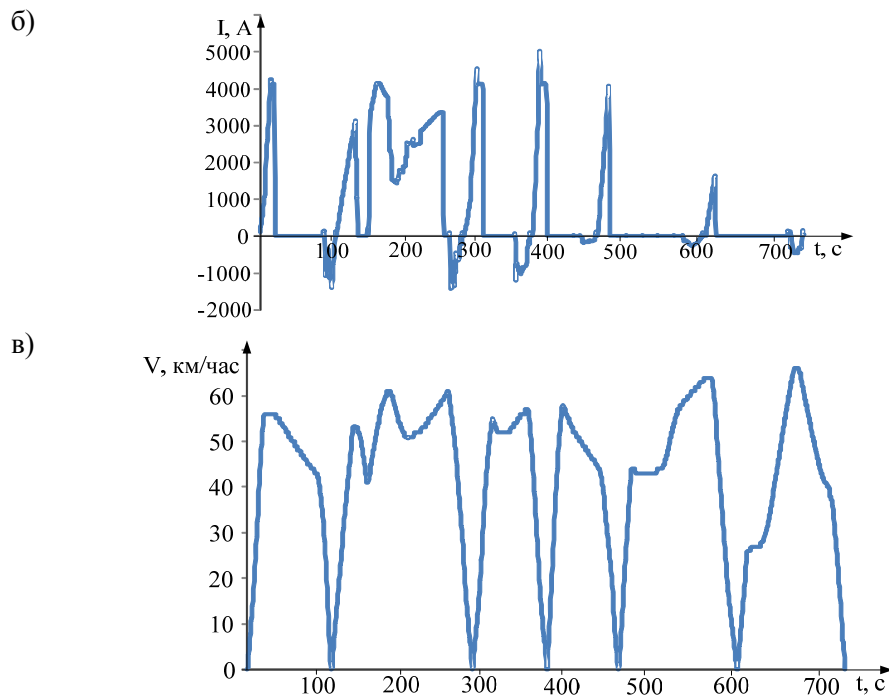


Рис. 1. Осциллограммы при эксплуатации поезда с системой рекуперации между станциями «Политехнический институт–Академгородок»:
а) напряжение на токоприемнике $U(t)$; б) ток поезда $I(t)$; в) скорость движения поезда $V(t)$

Для каждого режима ведения по результатам обработки осциллограмм определены средние значения напряжения контактной сети (на токоприемнике) и потребляемого (рекуперируемого) тока по формулам:

$$U_{cp} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k U_i; \quad (1)$$

$$I_{cp} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k I_i; \quad (2)$$

где k – частота опроса при обработке осциллограмм.

Также определена длительность каждого режима ведения (тяги, выбега, торможения) поезда с системой рекуперации при его движении между конечными станциями «Лесная–Академгородок–Лесная».

Таким образом, по результатам обработки данных, полученных с помощью испытательного комплекса в виде осциллограмм, определены начальные условия, которые задаются в виде матрицы для выполнения вышеуказанной процедуры исследований. Перед проведением процедуры исследований выполнена оценка количества электроэнергии, которое выделяется при каждом единичном рекуперативном торможении по формуле:

$$A_{рек} = \frac{I_{ср.рек} \cdot U_{ср.рек} \cdot t_{рек}}{3600 \cdot 1000}; \quad (3)$$

где $I_{ср.рек}$ – среднее значение тока в режиме рекуперативного торможения;
 $U_{ср.тяги}$ – среднее значение напряжения в режиме рекуперативного торможения;
 $t_{рек}$ – длительность режима рекуперативного торможения.

Результаты исследований показали, что количество рекуперированной электроэнергии при единичных торможениях для заданных условий ведения подвижного состава с системой рекуперации между конечными станциями «Лесная–Академгородок–Лесная» изменяется в пределах от 0,95 кВт·час (3,42 МДж) до 44,4 кВт·час (160 МДж). На основании результатов исследований рассмотрено использование на подвижном составе с системой рекуперации трех различных накопителей с рабочей энергоемкостью соответственно 5; 10; 44,4 кВт·час (18; 36; 160 МДж). При выполнении исследований также принято, что для накопителей коэффициент возврата электроэнергии равен 0,9 ($k_b=0,9$). Таким образом, на основании ранее предложенной процедуры исследований при размещении на подвижном составе накопителей указанной энергоемкости определено количество потребляемой, рекуперированной в накопитель, а также избыточной электроэнергии при заданных условиях его ведения.

Результаты исследований энергообменных процессов при размещении на подвижном составе с системами рекуперации накопителей различной энергоемкости, приведены на рис. 2.

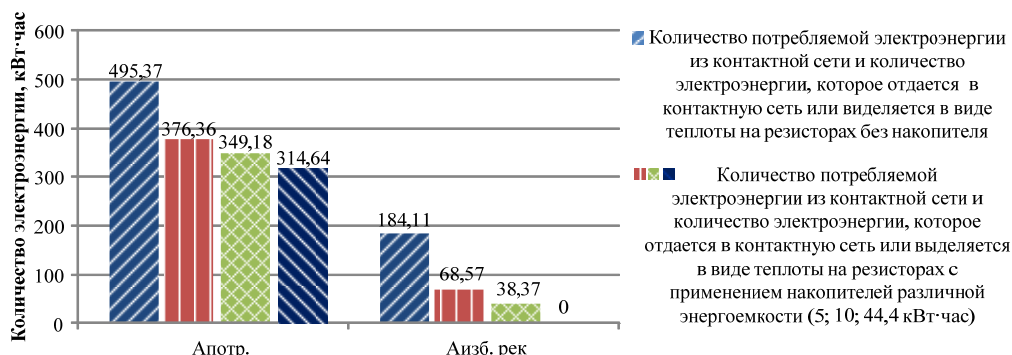


Рис. 2. Диаграммы количества потребляемой и рекуперированной электроэнергии при заданных условиях ведения подвижного состава с системами рекуперации без накопителя и с применением накопителей различной энергоемкости

По результатам полученных данных (рис. 2) рассчитано процентное уменьшение количества потребляемой электроэнергии из контактной сети (α , %), а также процентное уменьшение количества избыточной электроэнергии рекуперативного торможения (β , %) за счет применения накопителей энергии различной энергоемкости по формулам:

$$\alpha = \left(1 - \frac{A_{потр. нак}}{A_{потр}} \right) \cdot 100; \quad (4)$$

$$\epsilon = \left(1 - \frac{A_{\text{изб. рек. нак}}}{A_{\text{изб. рек}}} \right) \cdot 100; \quad (5)$$

где $A_{\text{потр}}, A_{\text{потр. нак}}$ – количество потребляемой электроэнергии из контактной сети без применения и с применением накопителя энергии, кВт·час; $A_{\text{изб. рек}}, A_{\text{изб. рек. нак}}$ – количество избыточной рекуперированной электроэнергии без применения и с применением накопителя энергии, кВт·час.

Результаты расчетов, выполненные по формулам (4) и (5), представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов

Рабочая энергоемкость накопителя, кВт·час (МДж)	α	β
5 (18)	24,0	62,8
10 (36)	29,5	79,2
44,4 (160)	36,5	100

Выводы и предложения. По результатам выполненных исследований установлено, что размещение накопителей энергии с рабочей энергоемкостью 5; 10; 44,4 кВт·час (18; 36; 160 МДж) на подвижном составе метрополитена с системой рекуперации при его заданном режиме ведения между конечными станциями Святошинско-Броварской линии, позволит уменьшить количество потребляемой электроэнергии из контактной сети соответственно на 24,0; 29,5; 36,5 %. Также установлено, что применение накопителей с рабочей энергоемкостью 5 кВт·час (18 МДж) и 10 кВт·час (36 МДж) для заданных условий, позволит уменьшить количество избыточной электроэнергии рекуперативного торможения соответственно на 62,8 % и 79,2 %. Для сохранения полного объема электроэнергии рекуперативного торможения требуется размещать накопитель энергии с рабочей энергоемкостью не менее чем 44,4 кВт·час (160 МДж).

Дальнейшие исследования должны быть направлены на определение рациональной энергоемкости накопителей энергии, размещаемых на подвижном составе метрополитена с системой рекуперации, при его заданном режиме ведения на конкретной линии. При этом рекомендуется определять рациональную энергоемкость по критерию минимального срока окупаемости накопителей энергии, исходя из количества сохраняемой и повторно используемой ими электроэнергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kelrykh, M.* Perspective directions of planning carrying systems of gondolas [Текст]/ М. Kelrykh, О. Fomin / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2014, No. 6 – P.64-67.
2. *Кельріх, М.Б.* Структурно-функціональне описання конструкції модуля кузова сучасних універсальних напіввагонів [Текст]/ М.Б. Кельріх, В.І.Мороз, О.В. Фомін // Науковий журнал – Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ: СНУ ім. В.Даля, 2014. – № 2(210). – С. 94-103.
3. *Фомін, О.В.* Підвищення ступеня ідеальності вантажних вагонів та прогнозування стадій їх еволюції [Текст]/ О.В. Фомін, // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – №3. – С.68-76 – Режим доступу:

<http://nvngu.in.ua/index.php/uk/golovna/1049-ukrcat/arkhiv-zhurnalu/2015/zmist-3-2015/geotekhnichna-i-girnichna-mekhanika-mashinobuduvannya/2975-pidvishchennya-stupenya-idealnosti-vantazhnikh-vagoniv-ta-prognozuvannya-stadij-jikh-evolyutsiji>

4. *Розпорядження* Кабінету Міністрів України № 1361-р: офіц. текст: «Про схвалення Концепції Державної цільової програми будівництва та розвитку мережі метрополітенів на період до 2020 року» [схвалено Кабінетом Міністрів України від 28.12.2011 р.]. – К.: Офіційний вісник України, 2012. – Вип. № 4. – С. 165.

5. *Про енергозбереження*: [закон України: офіц. текст: прийнятий Постановою Верховної Ради України № 75/94-ВР від 01.07.1994 р. зі змінами і доповненнями внесеними Законами України]. – К.: Парламенське вид-во, 2014. – 15 с.

6. *Комплексна* програма оновлення залізничного рухомого складу України на 2008–2020 роки, затвердженої Наказом Міністерства транспорту і зв'язку України № 1259 від 14.10.2008 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://uz.gov.ua>

7. 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; ГП «Государственный научно-исследовательский центр железнодорожного транспорта Украины». – К., 2015. – 188 с. – Библиогр.: с. 150–163.

8. *Постанова* Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 220: офіц. текст: [схвалено Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 26.02.2015 р. та зареєстровано в Міністерстві юстиції України від 02.03.2015 р.]. – К.: Офіційний вісник України, 2015. – Вип. № 15/1. – С. 399.

9. Донченко, А.В. Дослідження енергоефективності модернізованого поїзда метрополітену виробництва ПАТ «КВБЗ» / А.В. Донченко, С.О. Мужичук, А.О. Сулим, П.О. Хозя, О.О. Мельник // Збірник наукових праць «Рейковий рухомий склад». – Кременчук: Вид-во ДП «УкрНДІВ», 2015. – Вип. 12. – С. 48–56.

10. Гаврилов, Я.И. Вагоны метрополитена с импульсными преобразователями / Я.И. Гаврилов, В.А. Мнацаканов. – М.: Транспорт, 1986. – 229 с.

11. Sone, S. Экономия энергии на рельсовом транспорте Японии / S. Sone // Железные дороги мира. – 2013. – № 8. – С. 47–53.

12. Саблін, О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вип. 6/8 (72). – С. 9–13.

13. Щуров, Н.И. Применение накопителей энергии в системах электрической тяги / Н.И. Щуров, К.В. Щеглов, А.А. Штанг // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск, 2008. – Вип. № 1 (51). – С. 99–104.

14. Шевлюгин, М.В. Ресурсо- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. дис.... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Шевлюгин Максим Валерьевич; Московский государственный университет путей сообщения – М., 2013. – 48 с. – Библиогр.: с. 45–48.

15. Negishi, H. Аккумуляция энергии на железных дорогах // H. Negishi // Железные дороги мира. – 2003. – № 6. – С. 55–59.

16. Бычкова, М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро / М.П. Бычкова // Энергосовет. – 2011. – Вип. 3 (16). – С. 74–76.

17. *Накопители* энергии : под ред. Д.А. Бута / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

18. Устенко, А.В. Использование накопителей энергии для улучшения параметров локомотивов / А.В. Устенко, О.В. Пасько // Локомотив-інформ. – 2012. – № 10. – С. 4–6.

19. Любарский, Б.Г. Сравнительный анализ накопителей энергии для транспортных средств / Б.Г. Любарский, В.П. Шайда, С.Г. Буряковский // Залізничний транспорт України. – 2015. – Вип. 6. – С. 13–21.

20. Костин, Н.А. Автономность рекуперативного торможения – основа надежной энергоэффективной рекуперации на электроподвижном составе постоянного тока / Н.А. Костин, А.В. Никитенко // Залізничний транспорт України. – 2014. – Вип. 3. – С. 15–23.

21. Сулим, А.А. Расчет энергии рекуперации при установке накопителя на электропоезде метрополитена / А.А. Сулим, А.И. Ломонос // Збірник наукових праць ДЕТУТ: «Транспортні системи і технології». – К.: ДЕТУТ, 2013. – Вип. № 23. – С. 22–29.

22. *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.

*Andrii Sulym, PhD (Technical Sciences)
(Senior Researcher, State Enterprise «State Research Center of Railway
Transport of Ukraine»)*

RESEARCH OF ENERGY-EXCHANGED PROCESSES DURING METRO ROLLING STOCK OPERATION WITH RECUPERATION SYSTEMS AND ENERGY STORAGE DEVICES

One of the basic and pressing problems at the moment, that is energy saving on the metro rolling stock, was considered in the article. It was discovered from the previous research that use of recuperation systems and energy storage devices on the rolling stock is a prospective line in energy saving for traction. The purpose of the article is the exchange processes research for determination of energy consumption and recuperated electric energy quantity with installation of energy storage devices of different energy capacity. Experimental research works of energy exchange processes for a specified rolling stock operation with recuperation systems were performed. Based on the above mentioned procedure, research works were performed at installation of energy storage devices having different energy capacity on the rolling stock. In accordance to these results the quantity of consumed, recuperated to the storage device and excess energy at specified operation conditions was determined. It was determined that installation of energy storage devices with energy consumption of 5; 10; 44,4 kW/h helps to reduce energy consumption from the contact system accordingly to 24,0; 29,5; 36,5 %. Further research must be aimed at determination of the efficient energy consumption of storage devices installed on the metro rolling stock with recuperation systems at the specified operation mode on a particular line.

Keywords: metro rolling stock, recuperation system, energy storage device.

REFERENCES

1. *Kelrykh, M.* Perspective directions of planning carrying systems of gondolas [Текст] / M. Kelrykh, O. Fomin / Scientific and technical journal «Metallurgical and Mining Industry». 2014, No. 6 – P.64-67.
2. *Kelrikh, M. B.,* Structural-functional description of module design exterior modern universal gondola cars [Text] / M. Kelsh, Moroz V. I., Fomin A. // Scientific journal – Bulletin of East-Ukrainian national University named after Volodymyr Dahl. – Lugansk: the DREAM im. Dal, 2014. – № 2(210). – S. 94-103.
3. *Fomin, A. V.* Increasing the degree of ideality of freight wagons and forecasting stages of their evolution [Text] / A. V. Fomin, // Scientific Bulletin of National mining University. – Dnepropetrovsk: NMU, 2015. – No. 3. – P. 68-76 – Mode of access: <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/golovna/1049-ukreat/arkhiv-zhurnalu/2015/zmist-3-2015/geotekhnichna-i-girnichna-mekhanika-mashinobuduvannya/2975-pidvishchennya-stupenya-idealnosti-vantazhnikh-vagoniv-ta-prognozuvannya-stadij-jikh-evolyutsiji>.

4. *Rozporyadzhennya Kabinetu Ministriv Ukrainy № 1361-r* [The Order of Cabinet Ministers Ukraine]. Kyiv, Ofitsiyni visnyk Ukrainy, 2012, no. 4. 165 p.
5. *Pro energozberezheniya: zakon Ukrainy* [On energy saving: Ukrainian law]. Kyiv, Parlamentske vydavnytstvo Publ., 2014. 15 p.
6. *Kompleksna programa onovlennya zaliznychnogo rukhomogo skladu Ukrainy na 2008–2020 roky* [A comprehensive program of updating the railway rolling stock of Ukraine for 2008–2020 years]. Available at: <http://uz.gov.ua>.
7. Sulim A.A. *Povysheniye effektivnosti energoobespecheniya podvizhnogo sostava metropolitena s sistemami rekuperatsii putem primeneniya emkostnykh nakopiteley energii* Cand, Diss. [Improvement of power supply the effectiveness rolling stock equipped with recuperation system by using a capacitive energy storage]. Kyiv, 2015. 188 p.
8. *Postanova natsionalnoi komisii, shcho zdiisniue derzhavne reguliuvannya u sferakh energetyky ta komunalnykh poslug № 220* [The decision of the National Commission, carrying out state regulation in energy and utilities]. Kyiv, Ofitsiyni visnyk Ukrainy, 2015, no. 15/1. 399 p.
9. Donchenko A.V., Muzhychuk S.O., Sulim A.O., Khozya P.O., Melnyk O.O. *Doslidzhennya energoefektyvnosti modernizovanogo poizda metropolitenu vyrobnytstva PAT «KVBZ»* [A study of energy efficiency of a modernized train of the metro production of PJSC «KRCBW»]. *Zbirnyk naukovykh prats «Reikovi rukhomiy sklad»* [Proceedings of «Rail rolling stock»], 2015, issue 12, pp. 48–56.
10. Gavrilov Yu.I., Mnatsakanov V.A. *Vagony metropolitena s impulsnyimi preobrazovatelyami* [The subway cars with pulse converters]. Moscow, Transport Publ., 1986. 229 p.
11. Sone S. *Ekonomiya energii na relsivom transporte Yaponiy* [Energy savings of rail transport in Japan]. *Zheleznodorozhnye dorogi mira – Railway roads of the world*, 2013, no. 8, pp. 47–53.
12. Sablin O.I. *Doslidzhennya efektyvnosti protsesu rekuperatsii elektroenerгии v umovakh metropolitenu*. [Research of efficiency of recovery of electricity under metro]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – East European Journal of advanced technologies*, 2014, vol. 72, no. 6/8, pp. 9–13.
13. 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]. *Zbornik nauchnykh trudov NGTU* [Proceedings of the NSTU], 2008, vol. 51, no. 1, pp. 99–104.
14. Sulim A.A. *Resurso- i energosberigayushchie tekhnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenakh, realizuemye s ispolzovaniem nakopiteley energii*. Avtoreferat Doct, Diss. [Resource and energy saving technologies on railway transport and subway systems that are implemented with the use of energy storage]. Moscow, 2013. 48 p.
15. Negishi H. *Akkumulirovaniye energii na zheleznykh dorogakh* [Energy storage on the railways]. *Zheleznodorozhnye dorogi mira – Railway roads of the world*, 2003, no. 6, pp. 55–59.
16. Bychkova M.P. *Sistema nakopiteley elektroenerгии dlya povysheniya energoeffektivnosti v metro* [The system stores electricity for energy efficiency in the subway]. *Energosovet – Energosovet*, 2011, vol. 3, no. 16, pp. 74–76.
17. But D.A., Alievskiy B.L., Mizyurin S.R., Vasyukevich P.V. *Nakopiteli energii*. [Storage energy]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 400 p.
18. Ustenko A.V., Pasko O.V. *Ispolzovaniye nakopiteley energii dlya uluchsheniya parametrov lokomotivov* [The use of energy storage to improve the parameters of locomotives]. *Lokomotiv-inform – Lokomotiv inform*, 2012, no. 10, pp. 4–6.
19. Lyubarskiy B.G., Shayda V.P., Buryakovskiy S.G. *Sravnitelnyy analiz nakopiteley energii dlya transportnykh sredstv* [Comparative analysis of the energy storage devices for vehicles]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2015, issue 6, pp. 13–21.
20. Kostin N.A., Nikitenko A.V. *Avtonomnost rekuperativnogo tormozheniya – osnova nadezhnoy energoeffektivnoy rekuperatsii na elektropodvizhnom sostave postoyannogo toka* [Autonomy of regenerative braking – the bases of reliable energy efficient recovery for electric rolling DC]. *Zaliznychnyi transport Ukrainy – Railway transport of Ukraine*, 2014, issue 3, pp. 15–23.
21. Sulim A.A., Lomonos A.I. *Raschet energii rekuperatsii pri ustanovke nakopiteley na elektropoezde metropolitena* [Calculation of energy recovery when installing the drive on an electric train subway]. *Zbirnyk naukovykh prats DETUT: «Transportni systemy i tekhnologii»* [Collected Works DETUT: «Transport Systems and Technologies»], 2013, issue 23, pp. 22–29.
22. Sychev S.D. *Programnyi kompleks dlya zboru, vidobrazhennya, zapysu ta podalshoi matematichnoi obrobky danykh z analogo-tyyfrovyykh peretvoriuvachiv u kompiuteryzovanykh vymirivallykh kompleksakh («ELEKTRO»)* [The software package for collecting, displaying, recording and subsequent mathematical processing of analog-digital converters in a computerized measuring complexes («ELECTRO»)]. The certificate of registration of copyright, no. 16669, 2006.