

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-87-92>

УДК 62/3:629.4:625.42

## ЗАСТОСУВАННЯ БОРТОВИХ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ НЕЗНАЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ТА ЕНЕРГОЄМНОСТІ НА РУХОМОМУ СКЛАДІ МЕТРОПОЛІТЕНУ

Сулим А.О., Хозя П.О., Мельник О.О.

## USE OF ON-BOARD LOW POWER AND CAPACITY ENERGY STORAGE DEVICES ON THE METRO ROLLING STOCK

Sulym A.O., Khozia P.O., Melnyk O.O.

*В статті запропоновано технічне рішення щодо застосування ємнісних накопичувачів енергії на рухомому складі метрополітену. Сутність технічного рішення полягає у використанні в силовому колі рухомого складу метрополітену ємнісного накопичувача порівняно незначної потужності та енергоємності. Встановлено, що впровадження запропонованого технічного рішення дозволить підвищити енергетичну ефективність рухомого складу метрополітену та покращити його техніко-експлуатаційні характеристики.*

**Ключові слова:** бортовий ємнісний накопичувач енергії, потужність, енергоємність, рухомий склад метрополітену.

**Вступ.** Залізничний транспорт займає провідне місце у задоволенні потреб економіки та населення України в перевезеннях, є важливим фактором забезпечення соціально-економічного зростання і зміцнення обороноздатності держави [1–4].

Однією з важливих ланок в сучасній транспортній інфраструктурі міст-мегаполісів є метрополітен, який порівняно з іншими видами міського транспорту володіє найбільшими перевізними можливостями. Крім того, метрополітен швидкий та комфортний перевізник, що дозволяє його класифікувати як перспективний вид пасажирського транспорту на досить тривалий період. Разом з тим, вітчизняні метрополітени є потужними та енергоємними споживачами електроенергії. Тому на сьогоднішній день у зв'язку з постійним поетапним підвищенням вартості енергоресурсів гостро постає питання щодо необхідності підвищення енергоефективності перевезень в метрополітені [5, 6].

На даний час в метрополітенах України перевезення пасажирів забезпечується, насамперед, поїздами з колекторними двигунами постійного струму послідовного збудження та релейно-контактними системами керування. З метою скорочення споживання електроенергії на тягу в останні роки створю-

ється новий та модернізується існуючий вітчизняний рухомий склад метрополітену. Головними відмінностями новоствореного та модернізованого рухомого складу є використання асинхронного електроприводу змінного струму, мікропроцесорної системи керування, а також впровадження іншого енергозберігаючого обладнання та технологій, насамперед систем рекуперації. Таким чином, в метрополітенах України виконуються заходи з енергозбереження та підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену шляхом заміни застарілого тягового обладнання на нове з реалізацією рекупративного гальмування [5].

За результатами досліджень [5–14] встановлено, що при ефективному використанні електроенергії рекупративного гальмування рухомого складу метрополітену можливо скоротити споживання електроенергії на тягу до 40 %. Однак в умовах реальної експлуатації на величину використання електроенергії рекуперації впливає багато факторів [5–9, 15]. Серед основних можна виділити наступні: інтенсивність руху в зоні рекуперації, режим руху інших споживачів електроенергії, відстань між станціями та профіль колії. За результатами аналізу досліджень [7–9] встановлено, що за існуючої інфраструктури системи тягового енергозабезпечення метрополітену використання електроенергії рекуперації має імовірнісний характер. Ефективність використання електроенергії рекупративного гальмування складає на рівні 5–10 %, що споживається на тягу [8]. Отже, в даний час можливості рекуперації використовуються не в повному обсязі і існує проблема реалізації надлишкової електроенергії за відсутності споживачів в зоні рекуперації. Як наслідок, існують резерви щодо підвищення енергоефективності рухомого складу метрополітену за умов ефективного використання електроенергії рекупративного гальмування.

Із робіт [5–11, 15–17] відомо, що одним з перспективних напрямків підвищення енергоефективності рухомого складу з системами рекуперації є впровадження на його борту накопичувачів енергії. Ідея застосування накопичувачів енергії не є новою і має більш ніж п'ятдесятилітню історію. Однак не дивлячись на те, що в останній час спостерігається значний прогрес в розвитку накопичувачів енергії, перетворювальної техніки і техніки управління, все ж використання потужних та енергоємних накопичувачів енергії в даний час є проблематичним [10, 15, 18, 19]. При цьому основними перепонами є масогабаритні параметри накопичувачів та перетворювачів, а також їх вартість. На сьогоднішній день значна кількість досліджень як вітчизняних, так і закордонних вчених направлена на вирішення зазначених проблем.

Але слід зазначити, що на даний час промисловістю освоєно виробництво силових ємнісних накопичувачів енергії порівняно незначної потужності та енергоємності, які складаються з конденсаторних модулів та мають блочно-модульну конструкцію [5, 11, 14–16, 18, 19]. При цьому одним з важливих питань є розробка технічного рішення щодо ефективного керування енергообмінними процесами між контактною мережею, електродвигунами рухомого складу та бортовим ємнісним накопичувачем енергії під час штатних і аварійних режимів роботи системи тягового енергозабезпечення метрополітену.

**Метою роботи** є розробка технічного рішення щодо впровадження бортових ємнісних накопичувачів незначної потужності та енергоємності на рухомому складі метрополітену з системами рекуперації.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** У порівнянні з існуючими технічними рішеннями [20–22], в яких запропоновано використовувати потужні та енергоємні накопичувачі енергії з можливістю збереження повного об'єму надлишкової електроенергії рекуперативного гальмування, в основу розробки даного технічного рішення поставлено задачу створення пристрою для накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену за рахунок спрощення конструкції, зменшення масогабаритів і вартості. При цьому має забезпечуватись достатня ефективність накопичення та використання електроенергії в автоматичному режимі керування енергообмінними процесами.

Розроблене технічне рішення передбачає використання в силових колах рухомого складу метрополітену бортових ємнісних накопичувачів енергії порівняно невеликої потужності та енергоємності – порядку 500–1000 кВт та 0,6–3 кВт·год відповідно. Це відповідає близько 7–12 конденсаторним модулям типу 60ЕК406 виробництва фірми ЗАТ «ЕЛТОН» («Есма»), які можливо розмістити на рухомому складі метрополітену без суттєвих компонувальних переробок.

Сутність заявленого технічного рішення пояснюється фігурою креслення (рис.), на якій представлена принципова блок-схема пристрою.

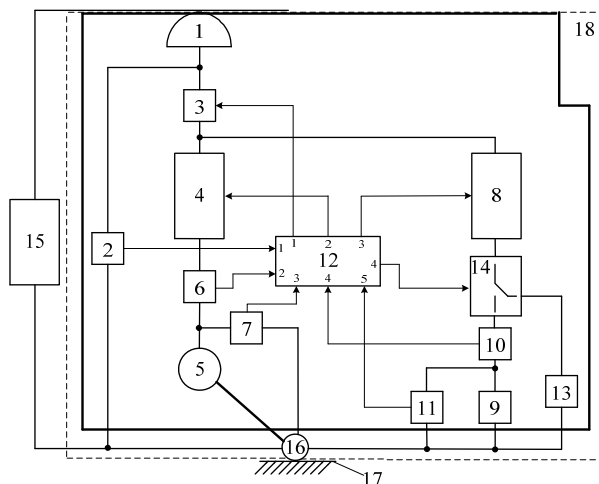


Рис. Пристрій для накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену

Пристрій для накопичення енергії рекуперативного гальмування рухомого складу метрополітену містить струмоприймач 1, датчик напруги контактної мережі 2, керований комутатор контактної мережі 3, блок перетворення електроенергії 4, електродвигун 5, датчик струму електродвигуна 6, датчик напруги електродвигуна 7, реверсивний перетворювач 8, ємнісний накопичувач 9, датчик струму накопичувача 10, датчик напруги накопичувача 11, блок керування 12, гальмівний резистор 13 та керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14.

Струмоприймач 1 виконаний з можливістю з'єднання з контактною мережею 15 і послідовно з'єднаний з електродвигуном 5 через керований комутатор контактної мережі 3, блок перетворення електроенергії 4 і датчик струму електродвигуна 6. Вихід струмоприймача 1 з'єднаний з датчиком напруги контактної мережі 2. Датчик напруги електродвигуна 7 паралельно підключений до електродвигуна 5. Електродвигун 5 виконаний з можливістю механічного з'єднання з приводними колесами транспортного засобу 16 і рейкою 17. Вхід реверсивного перетворювача 8 з'єднаний з виходом керованого комутатора контактної мережі 3, а його вихід з'єднаний з накопичувачем 9 та гальмівним резистором 13 через керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14.

Ємнісний накопичувач 9 виконаний у вигляді конденсаторних модулів, підключений до реверсивного перетворювача 8 та з'єднаний з датчиком струму накопичувача 10 і датчиком напруги накопичувача 11 відповідно послідовно і паралельно.

Гальмівний резистор 13 призначений для поглинання надлишкової енергії рекуперації і з'єднаний з ємнісним накопичувачем 9 паралельно.

Блок керування 12 виконаний у вигляді мікропроцесора і призначений для здійснення в автоматичному режимі керування енергообмінними процесами між контактною мережею 15, електродвигуном 5 та ємнісним накопичувачем 9. Входи 1–5 блоку керування 12 з'єднані з датчиками 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а його виходи 1–4 з'єднані з керованим комутатором контактної мережі 3, блоком перетворення

електроенергії 4, реверсивним перетворювачем 8 та керованим перемикачем накопичувача і гальмівного резистора 14 відповідно.

Блок керування 12 під час будь-якого режиму ведення (тяги, вибігу, рекуперативного гальмування) на входи 1-5 отримує сигнали з датчиків 2, 6, 7, 10, 11 відповідно, а через виходи 1-4 здійснює керування енергообмінними процесами.

Датчик 2 контролює напругу контактної мережі 15, датчик 6 – струм електродвигуна 5, датчик 7 – напругу електродвигуна 5, датчик 10 – струм накопичувача 9, датчик 11 – напругу ємнісного накопичувача 9.

Пристрій розміщений на рухомому складі метрополітену 18.

Пристрій можна використовувати при штатних та аварійних режимах роботи системи енергозабезпечення метрополітену. При штатних ситуаціях експлуатації рухомого складу робота пристрою пояснюється для режимів тяги, вибігу та рекуперативного гальмування.

Робота пристрою здійснюється таким чином.

Приклад 1. Штатні режими роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

Режим тяги.

Першочерговий рух рухомого складу метрополітену 18 здійснюється шляхом підключення струмоприймача 1 до контактної мережі 15 за допомогою контактного проводу (не показаний). При цьому рухомий контакт струмоприймача 1 з'єднаний з нерухомим контактом контактної мережі 15. Електродвигун 5, що отримує енергію від блока перетворення електроенергії 4, з'єднаний через керований комутатор контактної мережі 3 з контактною мережею 15, приводить у дію приводне колесо 16, що рухається по рейці 17. При цьому контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – замкнений; група ключів блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють напругу на електродвигуні 5; ключі реверсивного перетворювача 8 – розімкненні; керований перемикач накопичувача і гальмівного резистора 14 в положенні замкнення кола гальмівного резистора 13. Ємнісний накопичувач 9 знаходиться в розрядженому стані.

При попередньо зарядженому накопичувачі електродвигун 5 отримує енергію від блока перетворення електроенергії 4 через реверсивний перетворювач 8 з ємнісного накопичувача 9. При цьому контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – розімкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють напругу на електродвигуні 5; ключі реверсивного перетворювача 8 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють напругу та струм в колі ємнісного накопичувача 9; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола ємнісного накопичувача 9.

При розряді ємнісного накопичувача 9 живлення електродвигуна 5 здійснюється від контактної мережі 15. При цьому контакт керованого комутато-

ра контактної мережі 3 – замкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють напругу на електродвигуні 5; ключі реверсивного перетворювача 8 – розімкненні; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола гальмівного резистора 13.

Режим вибігу.

Струмоприймач 1 з'єднаний з контактною мережею 15 за допомогою контактного проводу (не показаний) і отримує від неї електроенергію.

При цьому контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – замкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 – розімкненні; ключі реверсивного перетворювача 8 – розімкненні; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола гальмівного резистора 13. Таким чином, електродвигун 5 від'єднаний від контактної мережі 15 та ємнісного накопичувача 9.

Режим рекуперативного гальмування.

При даному режимі ведення рухомого складу метрополітену 18 електродвигун 5 відключається від контактної мережі 15 та працює в режимі генератора. Блок керування 12 через виходи 1-4 здійснює процес заряду ємнісного накопичувача 9. При цьому контакт керованого комутатора контактної мережі 3 – розімкнений; ключі блоку перетворення електроенергії 4 працюють в режимі замкнення-розмикання; ключі реверсивного перетворювача 8 працюють в режимі замкнення-розмикання та регулюють струм і напругу заряду ємнісного накопичувача 9; керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола ємнісного накопичувача 9. Рівень заряду ємнісного накопичувача 9 контролюють датчики 10 та 11.

При повному заряді ємнісного накопичувача 9 блоком керування 12 здійснюється перевірка умов наявності інших споживачів в контактній мережі 15 за допомогою датчика напруги контактної мережі 2. При значенні напруги контактної мережі 15 меншого за задане, що відповідає значенню напруги холостого ходу тягової підстанції, блок керування 12 подає сигнал на замкнення керованого комутатора контактної мережі 3 та розмикання ключів реверсивного перетворювача 8. При цьому ключі блоку перетворення електроенергії 4 залишаються працювати в режимі замкнення-розмикання, керований перемикач гальмівного резистора і накопичувача 14 в положенні замкнення кола ємнісного накопичувача 9. За відсутності споживачів електроенергії в контактній мережі 15 блок керування 12 подає сигнал на розмикання керованого комутатора контактної мережі 3, на роботу ключів реверсивного перетворювача 8 в режимі замкнення-розмикання та переключення керованого перемикача гальмівного резистора і накопичувача 14 в положення кола гальмівного резистора 13, ключі блоку перетворення електроенергії 4 при цьому залишаються в режимі замкнення-розмикання. Надлишкова енергія, що генерується електродвигуном 5, поглинається гальмівним резистором 13.

Приклад 2. Аварійний режим роботи системи енергозабезпечення метрополітену.

При зменшенні напруги в контактній мережі 15 до значення 550 В і нижче або у разі її аварійного відключення датчик напруги контактної мережі 2 направляє сигнал на вхід 1 блока керування 12, який в свою чергу через вихід 1 формує команду на розрив і направляє її керованому комутатору контактної мережі 3. В результаті з'єднання електродвигуна 5 з контактною мережею 15 розривається.

Блок керування 12 направляє сигнал на замикання контакту керуючого перемикача гальмівного резистора і накопичувача 14, після чого живлення електродвигуна 5 здійснюється від ємнісного накопичувача 9. Блок перетворення електроенергії 4 та реверсивний перетворювач 8 забезпечують живлення електродвигуна 5 до використання повного об'єму електроенергії ємнісного накопичувача 9.

Одночасно датчик напруги контактної мережі 2 контролює стан напруги контактної мережі 15. Після підвищення напруги в контактній мережі 15 до значення більшого, ніж 550 В, за сигналом датчика напруги контактної мережі 2 блок керування 12 подає команду на замикання контакту керованого комутатора контактної мережі 3 і подальше живлення електродвигуна 5 здійснюється від контактної мережі 15 з одночасною зарядкою ємнісного накопичувача 9 до мінімального значення робочої напруги.

Для оцінки можливої кількості заощадженої електроенергії на рухомому складі метрополітену за рахунок впровадження зазначеного технічного рішення виконанні теоретичні дослідження за допомогою атестованих комп'ютерних програм «Motion Simulation» та «Рекуперація енергії». Дослідження проводились за умов максимального завантаження вагонів поїзда метрополітену під час його руху між кінцевими станціями Святошинсько-Броварської лінії КП «Київський метрополітен» з дотриманням «непікового» графіку руху. При дослідженнях прийнято, що потужність бортового ємнісного накопичувача енергії складає 840 кВт, енергоємність – 1,25 кВт·год. За результатами виконаних досліджень встановлено, що запропоноване технічне рішення при заданих умовах дозволить підвищити енергоефективність рухомого складу метрополітену з системами рекуперації на рівні 7 %.

Висновки. 1. У порівнянні з відомими запропоноване технічне рішення дозволяє суттєво зменшити вартість та масогабарити, а також розширити функціональні можливості пристрою для накопичення енергії рекуперативного гальмування, насамперед, завдяки використанню реверсивного перетворювача меншої потужності та бортового ємнісного накопичувача меншої потужності і енергоємності. Крім того, включення до складу пристрою керованого перемикача накопичувача і гальмівного резистора, а також застосування блока керування іншого конструктивного виконання дозволяє автоматизувати керування енергообмінними процесами між контактною мережею, електродвигунами рухомого складу, бортовим ємнісним накопичувачем і забезпечити ефективне використання електроенергії рекуперації в штатних та аварійних режимах роботи системи енергозабезпечення рухомого складу метрополітену.

2. За результатами математичного моделювання енергообмінних процесів під час експлуатації рухомого складу метрополітену на конкретній лінії встановлено, що впровадження розробленого технічного рішення дозволить підвищити енергетичну ефективність рухомого складу метрополітену з системами рекуперації на рівні 7 %.

### Література

1. Швець А.О. Аналіз засобів проектування та методів удосконалення конструкцій вантажного рухомого складу / А.О. Швець // Вісник Сертифікації залізничного транспорту. – 2018. – № 02 (48). – С. 61–73.
2. Fomin O. Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets / O. Fomin, I. Kulbovsky, E. Sorochinska, S. Sapronova, O. Bambura // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol 5, Issue 1 (89). P. 11-18. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109588
3. Tkachenko V. Research of resistance to the motion of vehicles related to the direction by railway / V. Tkachenko, S. Sapronova, I. Kulbovsky, O. Fomin // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol 5, Issue 7 (89). P. 65-72. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109791
4. Фомін О.В. Впровадження круглих труб в несучі системи напіввагонів з забезпеченням раціональних показників міцності / О.В. Фомін // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 4/1 (24). – С. 83–89.
5. Sulym A.O. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock / A.O. Sulym, O.V. Fomin, P.O. Khozia, A.G. Mastepan // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. – 2018. – No 5(167). – P. 79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
6. Шевлюгин М.В. Ресурс- и энергосберегающие технологии на железнодорожном транспорте и метрополитенах, реализуемые с использованием накопителей энергии: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.09.03 / Шевлюгин Максим Валерьевич; Московский гос. ун-т путей сообщения. – М., 2013. – 49 с.
7. Саблін О.І. Дослідження ефективності процесу рекуперації електроенергії в умовах метрополітену / О.І. Саблін // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Вып. 8 (72) / том 6/. – С. 9–13.
8. Кузнецов В.Г. Анализ резервов энергосбережения при внедрении системы рекуперации энергии на поездах Днепропетровского метрополитена / В.Г. Кузнецов, О.И. Саблин, П.В. Губский, Е.Г. Колыхаев // Гірничая електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. Нац. гірничого ун-ту. – Дніпропетровськ, 2015. – № 95. – С. 68–73.
9. Сулим А.А. Экономия электроэнергии при использовании рекуперативного торможения на вагонах метрополитена / А.А. Сулим, С.Д. Сычев, В.Р. Распопин [и др.] // Электромеханика и энергетические системы, методы моделирования та оптимизации. Збірник наукових праць X Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 28-29 березня 2012 р. – Кременчук, КрНУ, 2012. – С. 344.
10. Сулим А.О. Оцінка резервів енергозбереження під час штатних умов експлуатації рухомого складу метрополітену з системами рекуперації / А.О. Сулим,

- Третяк Е.В., Хозя П.О., Мельник О.О., Мужичук С.О. // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2019. – №3 (47). – С. 66 – 77.
11. Шевлюгин М.В. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в Московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии / М.В. Шевлюгин, К.С. Желтов // *НТТ – Наука и техника транспорта*. – М., 2008. – Вып. № 1. – С. 15–20.
  12. Бычкова М.П. Энергосбережение в метро / М.П. Бычкова // *Транспорт Российской Федерации*. – 2010. – Специальный выпуск «Наука и транспорт. Метрополитены будущего». – С. 67.
  13. Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро / М.П. Бычкова // *Энергосовет*. – 2011. – № 3 (16). – С. 74–76.
  14. 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. – Вып. № 1 (51). – С. 99–104.
  15. 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. – № 3. – С. 15–23.
  16. Нікітенко А.В. Збільшення об'єму рекуперованої електроенергії на електропоездах постійного струму / А.В. Нікітенко, М.О. Костін // *Залізничний транспорт України*. – 2015. – Вип. 3. – С. 25–31.
  17. Омеляненко В.И. Накопители энергии – перспективная технология для железных дорог / В.И. Омеляненко, В.Е. Бондаренко, Г.В. Омеляненко, Л.В. Оверьянова // *журнал «Локомотив-информ»*. – Харьков: Техно-стандарт, 2011. – № 4. – С. 4–9.
  18. Коссов Е.Е. Применение накопителей малой энергоемкости в силовой цепи тепловоза / Е.Е. Коссов, С.О. Никипелый // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля*. – Луганськ, 2010. – № 5 (147). – Частина 1. – С. 246–248.
  19. Авилов В.Д. Определение энергоемкости и мощности энергии для грузового электровоза постоянного тока / В.Д. Авилов, Ю.В. Москалев, С.А. Писаренко // *Известия Транссиба*. – 2013. – № 4 (16). – С. 51–58.
  20. Патент RU 2436690 C2 Российская Федерация, МПК (2006.01) B60L 7/12. Способ движения электрического транспортного средства на рекуперированной электроэнергии и устройство для его осуществления / С.С. Лиманский; патентообладатель: С.С. Лиманский – № 2010104636/11; заявка 11.02.2010; опубл. 20.12.2011; бюл. № 35.
  21. Патент RU 2379201 C1 Российская Федерация, МПК (2006.01) B60L 7/10. Способ рекуперации электрической энергии на рельсовом транспорте в накопительную установку вагона / А.Н. Анисов, Г.И. Криштафович, В.Я. Пахомов; патентообладатель: ООО НПФ «Уктус Электрик» – № 2008118850/11; заявка 14.05.2008; опубл. 20.01.2010; бюл. № 2.
  22. Декларацийний патент UA 83779 U Україна, МПК (2013.01) B60L 13/00. Пристрій накопичення електричної енергії тягового електричного комплексу електровоза / О.В. Бялобрюжеский, І.В. Шипунова; патенто-власник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського – № u2013 05046; заявка 19.04.2013; опубл. 25.09.2013; бюл. № 18.

## References

1. Shvec' A.O. Analiz zasobiv proektuvannya ta me-todiv udoskonalennja konstrukcij vantazhnogo ruhomogo skladu / A.O. Shvec' // *Visnik Sertifikacii zaliznizhnogo transportu*. – 2018. – № 02 (48). – S. 61–73.
2. Fomin O. Experimental confirmation of the theory of implementation of the coupled design of center girder of the hopper wagons for iron ore pellets / O. Fomin, I. Kulbovsky, E. Sorochinska, S. Saprionova, O. Bambura // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol 5, Issue 1 (89). P. 11-18. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109588
3. Tkachenko V. Research of resistance to the motion of vehicles related to the direction by railway / V. Tkachenko, S. Saprionova, I. Kulbovsky, O. Fomin // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol 5, Issue 7 (89). P. 65-72. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109791
4. Fomin O.V. Vprovadzhennja kruglih trub v nesuchi sistemi napivvagoniv z zabezpechennjam racional'nih poka-znikiv micnosti / O.V. Fomin // *Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva*. – 2015. – № 4/1 (24). – S. 83–89.
5. Sulym A.O. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the rolling stock / A.O. Sulym, O.V. Fomin, P.O. Khozia, A.G. Mastepan // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. – 2018. – No 5(167). – R. 79-87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8
6. Shevljugin M.V. Resurso- i jenergosberegajushhie tehnologii na zheleznodorozhnom transporte i metropolitenah, realizuemye s ispol'zovaniem nakopitelej jenerгии: avtoref. dis... dokt. tehn. nauk: 05.09.03 / Shevljugin Maksim Valer'evich; Moskovskij gos. un-t putej soobshhenija. – M., 2013. – 49 s.
7. Sablin O.I. Doslidzhennja efektyvnosti procesu rekuperacii elektroenerгии v umovah metropolitenu / O.I. Sablin // *Vostochno-Evropskij zhurnalпередовых технологий*. – 2014. – Vip. 8 (72) / tom 6/. – S. 9–13.
8. Kuznecov V.G. Analiz rezervov jenergosberezhenija pri vnedrenii sistemy rekuperacii jenerгии na poezdah Dnepropetrovskogo metropolitenu / V.G. Kuznecov, O.I. Sablin, P.V. Gubskij, E.G. Kolyhaev // *Girnicha elektromekhanika ta avtomatika: nauk.-tehn. zb. Nac. girnichogo un-tu*. – Dnipropetrovs'k, 2015. – № 95. – S. 68–73.
9. Sulim A.A. Jekonomija jelektrojenerгии pri is-pol'zovanii rekuperativnogo tormozhenija na vagonah metropolitenu / A.A. Sulim, S.D. Sychev, V.R. Raspopin [i dr.] // *Elektromekhanichni ta energetichni sistemi, modeliuvannya ta optimizacii. Zbirnik naukovih prac' H Mizhnarodnoi naukovo-tehnichnoi konferencii molodih uchenih i specialistiv u misti Kremenchuk 28-29 bereznja 2012 r.* – Kremenchuk, KrNU, 2012. – S. 344.
10. Sulim A.O. Ocinka rezerviv energozberezhenija pid chas shtatnih umov ekspluatacii ruhomogo skladu metropolitenu z sistemami rekuperacii / A.O. Sulim, Tretjak E.V., Hozja P.O., Mel'nik O.O., Muzhichuk S.O. // *Elektromekhanichni i energozberigajuchi sistemi*. – 2019. – №3 (47). – С. 66 – 77.
11. Shevljugin M.V. Snizhenie rashoda jelektrojener-gii na dvizhenie poezdov v Moskovskom metropolitene pri ispol'zovanii emkostnyh nakopitelej jenerгии / M.V. Shevljugin, K.S. Zheltov // *NTT – Nauka i tehnika transporta*. – M., 2008. – Vyp. № 1. – S. 15–20.
12. Bychkova M.P. Jenergosberezhenie v metro / M.P. Bychkova // *Transport Rossijskoj Federacii*. – 2010. –

- Special'nyj vypusk «Nauka i transport. Metropoliteny budushhego». – S. 67.
13. Bychkova M.P. Sistema nakopitelej jelektrojene-rgii dlja povyshenija jenergojeffektivnosti v metro / M.P. Bychkova // Jenergosovet. – 2011. – № 3 (16). – S. 74–76.
  14. Shhurov N.I. Primenenie nakopitelej jenerгии v sistemah jelektricheskoy tjagi / N.I. Shhurov, K.V. Shheglov, A.A. Shtang // Sbornik nauchnyh trudov NGTU. – Novosibirsk, 2008. – Vyp. № 1 (51). – S. 99–104.
  15. Kostin N.A. Avtonomnost' rekuperativnogo to-rmozhenija – osnova nadezhnoj jenergojeffektivnoj rekupe-racii na jelektropodvizhnom sostave postojannogo toka / N.A. Kostin, A.V. Nikitenko // Zaliznichnij transport Ukraїni. – 2014. – № 3. – S. 15–23.
  16. Nikitenko A.V. Zbil'shennja ob'emu rekuperovanoi elektroenerгии na jelektroїzdah postijnogo strumu / A.V. Nikitenko, M.O. Kostin // Zaliznichnij transport Ukraїni. – 2015. – Vip. 3. – S. 25–31.
  17. Omel'janenko V.I. Nakopiteli jenerгии – pers-pektivnaja tehnologija dlja zheleznyh dorog / V.I. Omel'ja-nenko, V.E. Bondarenko, G.V. Omel'janenko, L.V. Over'ja-nova // zhurnal «Lokomotiv-inform». – Harkiv: Tehnosta-ndart, 2011. – № 4. – S. 4–9.
  18. Kossov E.E. Primenenie nakopitelej maloj jenergoemkosti v silovoj cepi teplovoza / E.E. Kossov, S.O. Nikipelyj // Visnik Shidnoukraїns'kogo nacional'nogo universitetu imeni V. Dalja. – Lugansk, 2010. – № 5 (147). – Chastina 1. – S. 246–248.
  19. Avilov V.D. Opredelenie jenergoemkosti i moshh-nosti jenerгии dlja gruzovogo jelektrovoza postojannogo toka / V.D. Avilov, Ju.V. Moskaev, S.A. Pisarenko // Izvestija Transsiba. – 2013. – № 4 (16). – S. 51–58.
  20. Patent RU 2436690 C2 Rossijskaja Federacija, MPK (2006.01) B60L 7/12. Sposob dvizhenija jelektricheskogo transportnogo sredstva na rekuperirovannoї jelektrojenerгии i ustrojstvo dlja ego osushhestvlenija / S.S. Limanskij; patentoobladatel': S.S. Limanskij – № 2010104636/11; zajavka 11.02.2010; opubl. 20.12.2011; bjul. № 35.
  21. Patent RU 2379201 C1 Rossijskaja Federacija, MPK (2006.01) B60L 7/10. Sposob rekuperacii jelektricheskoy jenerгии na rel'sovom transporte v nakopitel'nuju ustanovku vagona / A.N. Anisov, G.I. Krishtafovich, V.Ja. Pahomov; patentoobladatel': OOO NPF «Uktus Jelektrik» – № 2008118850/11; zajavka 14.05.2008; opubl. 20.01.2010; bjul. № 2.
  22. Deklaracijnij patent UA 83779 U Ukraїna, MPK (2013.01) B60L 13/00. Pristrij nakopichennja elektrichnoi energii tjagovogo elektrichnogo kompleksu jelektrovoza / O.V. Bjalobrzhes'kij, I.V. Shipunova; patentovlasnik: Kremenchuc'kij nacional'nij universitet imeni Mihajla Ostrograds'kogo – № u2013 05046; zajavka 19.04.2013; opubl. 25.09.2013; bjul. № 18.

**Сулим А.А., Хозя П.А., Мельник А.А. Применение бортовых емкостных накопителей незначительной мощности и энергоемкости на подвижном составе метрополитена**

*В статье предложено техническое решение касательно применения емкостных накопителей энергии на подвижном составе метрополитена. Суть технического решения заключается в использовании в силовой цепи подвижного состава метрополитена емкостного накопителя сравнительно незначительной мощности и энергоемкости. Установлено, что внедрение предложенного технического решения позволит повысить энергетиче-*

*скую эффективность подвижного состава метрополитена и улучшить его технико-эксплуатационные показатели.*

**Ключевые слова:** бортовой емкостной накопитель энергии, мощность, энергоемкость, подвижной состав метрополитена.

**A. Sulym, P. Khozia, A. Melnyk Use of on-board low power and capacity energy storage devices on the metro rolling stock**

*Rail transport occupies a leading position in meeting the needs of economy and population of Ukraine in transportation and is an important factor in ensuring the socio-economic growth and military capability of the state. In the subways of Ukraine, are taken measures for saving energy and increasing energy efficiency of the rolling stock of the subway by replacing the outdated traction equipment with new ones by implementing regenerative braking. The energy efficiency of regenerative braking is at the level of 5-10% consumed by traction. At this moment, the possibility of recuperation is not used completely, and there is a problem of selling excessive electricity in the absence of consumers in the recuperation zone. As a result, there are reserves for increasing the energy efficiency of the rolling stock of the subway under the condition of the efficient use of electric energy of regenerative braking. The article proposes a technical solution for the use of capacitive energy storages on the rolling stock of the subway. The concept of the technical solution is to use a power circuit of the capacitive energy storage of the subway rolling stock of relatively small capacity and energy unlike existing solutions that use powerful and energy-intensive capacitive energy storages with the ability to save the full amount of excess regenerative braking electricity. One of the important issues is the development of a technical solution for the effective operation of energy-exchange processes between the overhead line, electric motors of the rolling stock and an on-board capacitive energy storages. It was established that the implementation of the proposed technical solution will allow to use it under standard (for traction, idle running and regenerative braking modes) and emergency operation modes of the subway energy supply system, as well as increase the energy efficiency of the subway rolling stock and improve its technical and operational characteristics. According to the results of mathematical modeling of energy-exchange processes during the operation of the subway rolling stock on a specific line, it has been established that the implementation of the developed technical solution will increase the energy efficiency of the subway rolling stock with recovery systems at the level of 7%.*

**Keywords:** onboard capacity storage devices, power, energy capacity, metro rolling stock.

**Сулим Андрій Олександрович** – кандидат технічних наук, заступник директора, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», [sulim1.ua@gmail.com](mailto:sulim1.ua@gmail.com)

**Хозя Павло Олександрович** – кандидат технічних наук, старший дослідник, завідувач науково-дослідної лабораторії експериментальних досліджень залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», [pavlo.khozia@gmail.com](mailto:pavlo.khozia@gmail.com)

**Мельник Олександр Олександрович** – завідувач науково-дослідної групи досліджень мікропроцесорних систем управління, тягово-енергетичного обладнання, електричного обладнання та комфорту залізничної техніки, Державне підприємство «Український науково-дослідний інститут вагонобудування», [om.oleksandrmelnyk@gmail.com](mailto:om.oleksandrmelnyk@gmail.com)