УДК 621.44.3:678-462 **DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.173.2017.118404**

РОЗРОБКА МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ГАЛЬМУВАННЯ НА ЗАЛІЗНИЦЯХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Канд. техн. наук О. В. Пасько, магістрант Р. Є. Тананян (ПАТ «Укрзалізниця»)

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТОРМОЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Канд. техн. наук О. В. Пасько, магистрант Р. Е. Тананян (ПАО «Укрзализныця»)

DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF THE USE OF RECUPERATIVE BRAKING ON RAILWAY ROADS

Candidate of Technical Science, O. Pasko, master R. Tananian

У статті подано результати аналітичних та розрахункових досліджень методів і засобів підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування на залізницях постійного струму. Проведено систематизацію наявних методів визначення питомої рекуперації на ділянці роботи локомотивних бригад. Розглянуто загальні принципи оцінки ефективності застосування рекуперативного гальмування поїздом в межах зони

моніторингу, застосування накопичувачів електричної енергії в системі тягового електропостачання і на електрорухомому складі. Техніко-економічні розрахунки підтвердили доцільність застосування розглянутих методів підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування.

***Ключові слова**: рекуперативне гальмування, накопичувач електричної енергії, система моніторингу, питома енергія рекуперації, тягова підстанція, пост секціонування.*

В статье представлены результаты аналитических и расчетных исследований методов и средств повышения эффективности применения рекуперативного торможения на железных дорогах постоянного тока. Проведена систематизация существующих методов определения удельной рекуперации на участке работы локомотивных бригад. Рассмотрены общие принципы оценки эффективности применения рекуперативного торможения поездом в пределах зоны мониторинга, применение накопителей электрической энергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе. Технико-экономические расчеты подтвердили целесообразность применения рассмотренных методов повышения эффективности применения рекуперативного торможения.

***Ключевые слова**: рекуперативное торможение, накопитель электрической энергии, система мониторинга, удельная энергия рекуперации, тяговая подстанция, пост секционирования.*

The article presents the results of analytical and computational studies of methods and means of increasing the efficiency of the use of recuperative inhibition on DC railways. The systematization of existing methods for determination of specific recovery at the site of locomotive brigades has been carried out. The order of formation of the database on the performed work of locomotive brigades is determined to ensure the efficiency of the application of recovery energy. The general principles of estimation of efficiency of application of recuperative braking by train in the limits of monitoring zone, application of electric energy storage devices in traction power system and on electromotive composition are considered. The ways of increasing the efficiency of recuperative inhibition, reduction of consumption and losses of electric power for traction are considered. Technical and economic calculations confirmed the feasibility of the application of the considered methods for increasing the efficiency of the use of recuperative inhibition.

***Key words**: recuperative braking, electric energy storage, monitoring system, specific energy of recovery, traction substation, post sectionalization.*

Вступ. Проблема енергозбереження та енергоефективності в промисловості та на транспорті є однією з найбільш актуальних у зв'язку з постійним зростанням тарифів на енергоресурси. У зв'язку з тим, що ПАТ «Укрзалізниця» є одним з найбільших споживачів електроенергії, порушена проблема також є актуальною.

Одним з найважливіших шляхів підвищення енергоефективності перевезень на залізничному транспорті є зниження втрат електроенергії в тяговій мережі та ефективне використання енергії рекуперативного гальмування [1-3]. Переваги рекуперативного гальмування широко відомі – це і підвищення безпеки руху поїздів і скорочення витрати енергії на тягу поїздів.

Рекуперація є однією з найважливіших складових енергозберігаючої технології перевізного процесу на залізницях України, одним з потужних джерел скорочення електроспоживання на тягу поїздів.

Основними чинниками, що перешкоджають збільшенню обсягу рекуперованої енергії, є: випадки браку

приймачів енергії рекуперації, недостатнє використання резервів технології водіння електрорухомого складу, брак умов застосування рекуперації в системі тягового електропостачання, недосконалість в організації руху поїздів, неполадки в системі рекуперації під час перевезення.

Таким чином, визначення резервів застосування рекуперативного гальмування, зниження витрати і втрат електроенергії шляхом вдосконалення режимів роботи системи тягового електропостачання, технології керування поїздами та організації їх руху є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування та створення ефективних способів та засобів рекуперативного гальмування є актуальним і багатоплановим завданням. Іншим актуальним завданням, пов'язаним із застосуванням рекуперативного гальмування, є економія енергетичних ресурсів, зменшення зносу гальмівних колодок та колісних пар локомотивів шляхом зменшення використання пневматичних гальм на користь рекуперативного гальмування.

Для забезпечення ефективності застосування рекуперативного гальмування були проведені експериментальні та розрахункові дослідження на основі рухомого складу (магістральні електровози постійного струму серій ВЛ8, ВЛ11, 2ЕС6, 2ЕС10, електропоїзди серії ЕПЛ2Т), а також враховано досвід багатьох авторів [4-5].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою проведення досліджень є визначення ефективності застосування методів підвищення рекуперативного гальмування на залізницях постійного струму, показників енергії рекуперації, показників економії енергетичних ресурсів, застосування енергоефективних графіків руху поїздів.

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати таке завдання: виконати систематизацію наявних методів визначення питомої рекуперації на ділянці роботи локомотивних бригад та обрати той метод, який задовольнить всі вимоги, що є передумовами в розробці методів та заходів з підвищення рекуперативного гальмування.

Основна частина. Для розв'язання завдання пропонуються такі основні заходи з підвищення обсягів енергії рекуперації:

— проведення мережевих шкіл з підвищення енергетичної ефективності рекуперативного гальмування;

— заміна на мережі залізниць застарілих локомотивів на сучасні та енергоефективні;

— створення в локомотивних депо бригад налагоджувачів схем рекуперативного гальмування;

— планування повернення електроенергії для колективів колон і для кожної локомотивної бригади вантажного руху;

— аналіз витрат і повернення електроенергії для виявлення лічильників, що мають значні відхилення з економії або перевитрати;

— розробка норм питомої рекуперації на кожній ділянці для електровозів усіх серій відповідно до маси поїзда;

— збір і аналіз інформації з причин незастосування локомотивними бригадами рекуперації, з щотижневим розбором на оперативних нарадах;

— організація контрольно-інструкторських поїздок;

— навчання локомотивних бригад навичок ефективного використання рекуперативного гальмування;

— упровадження мікропроцесорних енергооптимальних систем автоводіння як у вантажному, так і в пасажирському рухах;

— стимулювання локомотивних бригад за ефективне використання рекуперативного гальмування;

— застосування на тягових підстанціях випрямно-інверторних перетворювачів;

— застосування енергооптимальних графіків руху поїздів;

— водіння великовагових поїздів;

— застосування на ЕРС накопичувачів електричної енергії.

Наявні методи оцінки ефективності застосування рекуперативного гальмування відрізняються один від одного за цілою низкою ознак: за способом отримання вихідних даних — розрахунковий або статистичний; за об'єктами отримання даних — на електрорухомому складі й на тягових підстанціях; за рівнем деталізації — за поточну добу або за звітний період; за рівнем інтеграції — за міжпідстанційними зонами або укрупнено — за депо або залізницею тощо [6]. У таблиці подано класифікацію методів оцінки ефективності рекуперативного гальмування.

Таблиця

Класифікація методів оцінки ефективності рекуперативного гальмування

<table>
<tr><td colspan="3">Класифікація методів оцінки ефективності рекуперативного гальмування</td></tr>
<tr><td>Розрахунково-аналітичні методи</td><td>Розрахунково-статистичні методи</td><td>Експериментальні методи</td></tr>
<tr><td>Метод розрахунку енергетичної ефективності рекуперативного гальмування через визначення коефіцієнта рекуперації для залізничної ділянки</td><td>Метод оцінки ефективності рекуперативного гальмування за результатами обробки маршрутів машиніста</td><td>Метод проведення випробувань із застосуванням вимірювально-обчислювального комплексу (ВОК) (вимірювання вагон лабораторією)</td></tr>
<tr><td>Метод оцінки ефективності режиму рекуперації з урахуванням критеріїв сумарної економії електроенергії і найкращого використання пропускної здатності ділянки в зоні шкідливого спуску</td><td>Метод аналізу ефективності рекуперації на підставі порівняльної оцінки результативності повернення електроенергії до контактної мережі на різних рівнях інтеграції даних у депо</td><td>Метод синхронних вимірювань на електрорухомому складі й тягових підстанціях</td></tr>
<tr><td>Метод розрахунку ефективної зони рекуперації з урахуванням видалення поїздів у тяговому і рекуперативному режимах, величини і співвідношення їх струмів, а також напруги на шинах тягових підстанцій</td><td>Розрахунково-статистичний метод визначення обсягів рекуперації за мережею залізниць на основі регресійної моделі</td><td>Метод на основі експериментальних поїздок</td></tr>
<tr><td>Метод розрахунку надлишкової енергії рекуперації, що використовує принципи теорії ймовірності</td><td colspan="2" rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>Метод енергобалансу</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Імітаційне моделювання</td><td colspan="2">Метод накладення з урахуванням реальної напруги на струмоприймачі</td></tr>
<tr><td colspan="2">Метод визначення енергії рекуперації на підставі безперервного дослідження графіка руху</td></tr>
<tr><td colspan="2">Метод енергетичних діаграм</td></tr>
</table>

Аналіз методів і засобів оцінки ефективності застосування рекуперативного гальмування дозволяє визначити ключові передумови для розробки нового методу визначення ефективності застосування рекуперативного гальмування, зниження витрати і втрат електроенергії в тяговій мережі, що відповідає сучасним вимогам обліку й нормування енергоресурсів на залізничному транспорті:

— обов'язковість обліку режимів роботи і параметрів системи тягового електропостачання;

— необхідність оцінки ефективності рекуперативного гальмування в межах зон обліку, аж до МПЗ;

— можливість оцінки поїзної ситуації при рекуперативному гальмуванні;

— наявність можливості автоматизованого нормування питомої рекуперації для ділянки роботи локомотивної бригади;

— забезпечення передачі даних і подальша їх обробка в режимі Online;

— використання сучасних інформаційно-вимірювальних комплексів.

Порядок формування бази даних про виконану роботу локомотивних бригад для забезпечення ефективності застосування енергії рекуперації складається з таких завдань: аналіз стану працездатності системи рекуперативного гальмування, аналіз стану системи тягового електропостачання в межах зони моніторингу, аналіз графіка руху поїздів і застосування машиністом енергозберігаючих прийомів водіння, формування підсумкової звітної форми за результатами здійснених поїздок. В роботі проведено моніторинг застосування рекуперативного гальмування на ділянці Лозова – Харків (рис. 1, 2).

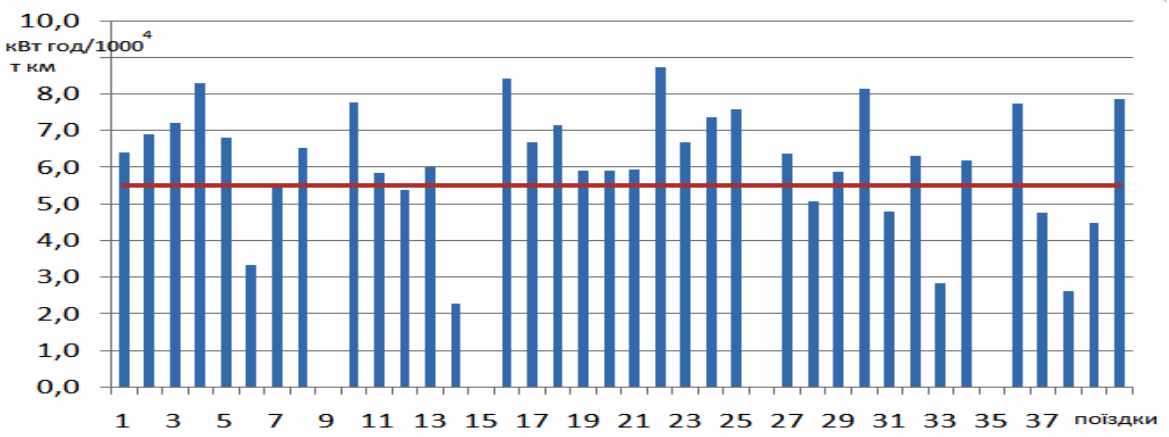

Рис. 1. Значення питомої рекуперації електровозів серії ВЛ11 на ділянці Лозова – Харків (4000 – 5000 т)

Як видно з рисунків, є поїздки, за якими повернення електроенергії є нижче середнього рівня на ділянці. Таким чином, є втрачена можливість повернення більшого обсягу енергії рекуперації на цій ділянці. За попередньою оцінкою, використання запропонованої системи моніторингу ефективності застосування рекуперативного гальмування дозволить підвищити частку рекуперації на ділянках Лозова-Харків та Харків-Лозова Південної залізниці в середньому на 10 % (рис. 3).

На сьогодні при реалізації будь-якого варіанта графіка руху поїздів економічна оцінка результатів реалізації здійснюється відповідно до затвердженої методики комплексної економічної оцінки результатів розробки графіка руху поїздів з урахуванням потенційної прибутковості перевезень [7-9].

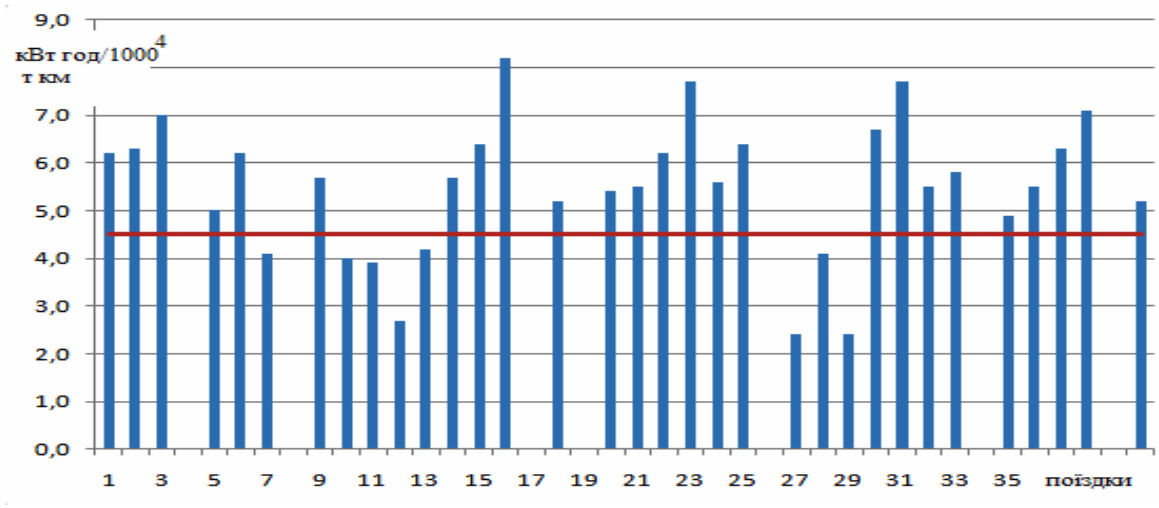

Рис. 2. Значення питомої рекуперації електровозів серії ВЛ-11 на ділянці Харків – Лозова (4000 – 5000 т)

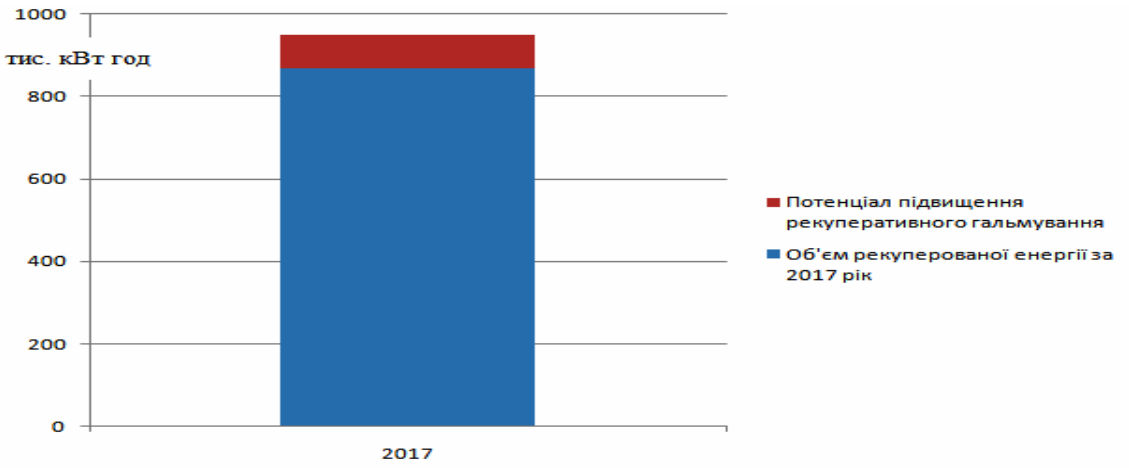

Рис. 3. Потенціал підвищення рекуперативного гальмування електровозами ВЛ11 на ділянках Лозова – Харків та Харків – Лозова Південної залізниці

Як відомо, на економічну оцінку розробленого графіка руху поїздів впливає низка різних показників:

— розміри руху;

— дільнична й технічна швидкість руху поїздів;

— вагові норми поїздів;

— типи електровозів;

— тарифи для вантажного й пасажирського руху.

Оскільки в запропонованому способі підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування й зниження добової витрати електроенергії шляхом коригування нормативного графіка наведені показники залишаються незмінними, то в нашому випадку оцінку техніко-економічної ефективності скорочення експлуатаційних витрат перевізного процесу шляхом оптимізації графіка руху поїздів необхідно провадити на основі скорочення добової витрати електроенергії.

Як приклад в роботі розглянуто ділянку Свердловської залізниці, а саме Єкатеринбург-Шаля, і визначено

економічний ефект від коригування добового нормативного графіка руху. У результаті коригування графіка руху вдалося скоротити витрати електроенергії на 1,9 %, або в грошовому еквіваленті, при вартості 1,75 грн. за 1 кВт • год, 38939 грн за одну добу. Коригування графіка руху виконувалося АПК «Ельбрус».

У роботі розглянуто застосування приймачів енергії рекуперації в системі тягового електропостачання та на рухомому складі, які дозволять забезпечити зміну напруги в контактній мережі в допустимих діапазонах. Порушені проблеми можуть бути розв'язані шляхом розміщення в системі тягового електропостачання (СТЕ) спеціальних приймачів енергії рекуперації (інвертори або пристрої, що поглинають). Поява різних типів зразків накопичувачів електроенергії (НЕЕ), що промислово виготовляються, а також розширення номінального ряду їх ємності дозволяє розглянути використання НЕЕ як приймача енергії рекуперації.

Перспективними видами накопичувачів для залізничного транспорту, зважаючи на їх характеристики, прийнято вважати такі: накопичувачі ємності електричної енергії на основі молекулярних суперконденсаторів (ЕНЕ); накопичувачі електричної енергії на основі надпровідності – надпровідникові індуктивні накопичувачі (НПІН); електромеханічні індуктивні накопичувачі електричної енергії.

Основним недоліком наявних накопичувачів електричної енергії щодо залізничного транспорту є їх висока вартість і габарити пристрою, а також низька питома енергія, що зберігається у Джоулях на кілограм (Дж/кг), і реалізована потужність. Найбільш ефективним і відповідним типом накопичувача енергії, з огляду на низку характеристик, для реалізації на залізничному транспорті й метрополітені можна вважати накопичувач ємнісного типу.

Як підтвержують численні дослідження, найбільш сприятливі місця установлення НЕЕ, з точки зору енергоефективності, є тягові підстанції, пости секціонування й електрорухомий склад [10-11] (рис. 4).

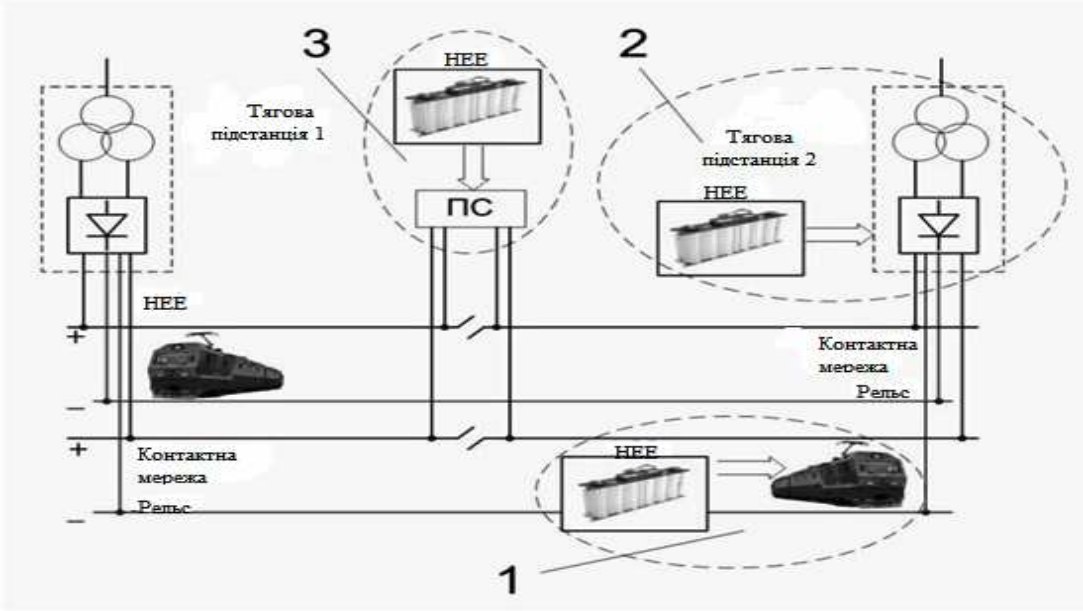

Рис. 4. Місця установлення НЕЕ:
1 — електрорухомий склад; 2 — тягова підстанція; 3 — пост секціонування

Якщо розміщення інверторів в системі тягового електропостачання нерозривно пов'язане з тяговими підстанціями, то НЕЕ можливо розміщувати на об'єктах, безпосередньо не пов'язаних із зовнішньою системою електропостачання, наприклад, на постах секціонування. Це дозволяє в низці випадків наблизити приймач енергії до місць з найбільшою частотою застосування рекуперативного гальмування або обсягами рекуперації. В роботі за допомогою комплексу Matlab Simulink подано імітаційну модель встановлення НЕЕ на посту секціонування. Результати імітаційного моделювання показують, що застосування НЕЕ на постах секціонування дозволяє поліпшити основні енергетичні характеристики режиму роботи системи тягового електропостачання. Зокрема, встановлено, що середню напругу на фідерах контактної мережі суміжних підстанцій можна збільшити на 3 %, знизити струм, що споживається, на 2 %. Запропонований варіант застосування ЕНЕ дозволяє скоротити втрати в контактній мережі на 0,85 % і скоротити сумарну витрату електроенергії на 1,71 %.

Висновки

1. Розроблено класифікацію методів оцінки ефективності застосування рекуперативного гальмування і комплекс основних вимог до визначення ефективності застосування рекуперативного гальмування, що дозволяє забезпечити технічну можливість достовірного визначення обсягів рекуперативного гальмування на ділянці проходження локомотивної бригади, виявлення причин його зниження на довільній ділянці залізниці, аж до міжпідстанційної зони.

2. Розроблено метод визначення ефективності застосування рекуперативного гальмування, зниження витрати і втрат електроенергії в тяговій мережі, що дозволяє проводити аналіз в межах довільної зони обліку, що враховує параметри й режими роботи системи тягового електропостачання, поїзної ситуації при рекуперативному гальмуванні, справність схеми рекуперативного гальмування і застосування машиністом енергозберігаючих прийомів водіння, а також запатентовано пристрій контролю режимів роботи тягової підстанції.

У перспективі можлива розробка автоматизованої системи моніторингу ефективності перевізного процесу з упровадженням в роботу накопичувачів електричної енергії на електрорухомому складі і в системі тягового електропостачання.

Список використаних джерел

1. Шатохин, А. П. Разработка методов и средств повышения эффективности применения рекуперативного торможения на железных дорогах постоянного тока [Текст]: дис. … канд. техн. наук / А. П. Шатохин. – Омск, 2017. – 175 с.

2. Набойченко, І. О. Підвищення ефективності тягового електропостачання постійного струму [Текст] / І. О. Набойченко, Б. А. Аржанніков // Залізничний транспорт. – 2015. – № 12. – С. 31-34.

3. Герман, Л. А. Ефективний спосіб ресурсозбереження в тяговій мережі змінного струму / Л. А. Герман, Д. С. Попов, К. В. Кішкурно [Текст] // Залізничний транспорт. – 2014. – №12. – С.63-65.

4. Косарєв, Б. І. Вантажні перенапруги в контактній мережі електрифікованих залізниць / Б. І. Косарев, А. В. Симаков, В. В. Хананом [Текст] // Транспорт: наука, техніка, управління. – 2007. – №1. – С. 15-19.

5. Мельниченко, О. В. Підвищення коефіцієнта потужності електровоза в режимі рекуперативного гальмування [Текст] / О. В. Мельниченко, С. Г. Шрамко, А. О. Линьков // Світ транспорту. – 2013. – Т.11. – № 3 (47). – С. 64-69.

6. Школников, Е. Н. Комерційний облік електричної енергії на електрорухомому складі [Текст] / О. М. Школьников, В. Т. Черемісін, С. Ю. Ушаков // Залізничний транспорт. – 2016. – №8. – С. 50-54.

7. Саблін, О. І. Підвищення ефективності рекуперації енергії в системі електротранспорту при обмеженому тяговому електроспоживанні [Текст] / Енергетика та енергозбереження. – 2014. – № 6/1(20). – С. 21-26.

8. Сидорова, Е. А. Статистичний метод нормування енергії рекуперації [Текст] / Е. А. Сидорова, А. І. Давидов // Локомотив. – 2012. – № 5. – С. 35-37.

9. Етапи реалізації автоматизованої системи моніторингу енергоефективності перевізного процесу [Текст] / В. Т. Черемісін, М. М. Никифоров, С. Ю. Ушаков [та ін.] // Залізничний транспорт. – 2015. – № 3. – С. 45-49.

10. Иванов, В. В. Оперативное управление участком энергоснабжения электрифицированных железных дорог [Текст] / В. В. Иванов, Е. Е. Бакеев. – М.: Транспорт, 1986. – 132 с.

11. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи [Текст] / А. Т. Бурков. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

12. Соколов, С. Д. Полупроводниковые преобразователи агрегатов тяговых подстанций [Текст] / С. Д. Соколов. – М.: Транспорт, 1979. – 264 с.

Пасько Ольга Володимирівна, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. 730-10-20. E-mail: zamdek@kart.edu.ua.
Тананян Роман Євгенович, магістрант ІППК (Проект ТЕМПУС IV) Українського державного університету залізничного транспорту, заступник начальника відновного поїзда станції Лозова виробничого підрозділу «Харківська дирекція залізничних перевезень» регіональної філії «Південна залізниця» ПАТ «Укрзалізниця». Тел. 0997710439. E-mail: romazverik2@gmail.com.

Pasko Olga Vladimirovna, Candidate of Technical Science (Ph.D), associate professor, Operation and repair of locomotives Department, Ukrainian State University of Railway Transport. E-mail: zamdek@kart.edu.ua.
Tananian Roman Evgenovich, gs of ESIRAT (project TEMPUS IV) Ukrainian State University of Railway Transport Deputy Head of the Reconstruction Train Station of Lozova, Production Division "Kharkiv Directorate of Railway Transportation" of the regional branch of the Southern Railway, PJSC "Ukrzaliznytsya". E-mail: romazverik2@gmail.com.

Стаття прийнята 16.11.2017 р.