

О. І. Саблін¹
Д. О. Босий¹
В. Г. Кузнецов¹
М. О. Баб'як¹
Є. М. Косарєв¹
П. В. Губський¹

ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕКУПЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ З ІНВЕРТОРНИМИ ТЯГОВИМИ ПІДСТАНЦІЯМИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

¹Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

Подані результати експериментального дослідження ефективності роботи інверторних підстанцій системи тягового електропостачання постійного струму в режимі рекуперації енергії. Встановлено, що інвертування надлишкової енергії рекуперації поїздів не забезпечує її оптимального розподілення та належного режиму напруги в тяговій мережі, що потребує розробки відповідних організаційних та технічних заходів з боку організації руху поїздів та тягового електропостачання. Показники якості енергії рекуперації на приєднаннях 35 кВ тягових підстанцій знаходяться в області гранично-допустимих значень, встановлених стандартом.

Ключові слова: рекуперація електроенергії, інверторні підстанції, тягове електропостачання, зовнішнє електропостачання, режим напруги, якість електроенергії.

Вступ

Особливістю роботи енергосистем електрифікованого транспорту є велика нерівномірність тягового електроспоживання і можливість значної рекуперації енергії (до 30...40 % від тягового електроспоживання). Проблемою раціонального використання рекуперативної енергії в системі неавтономного електротранспорту є складність забезпечення тягового навантаження в зоні рекуперації, що є випадковим процесом і не може повною мірою регулюватися оптимізацією транспортного потоку. За відсутності в тяговій мережі відповідного рівня поїзного навантаження рекуперація стає неможливою і на електротранспорті застосовується режим реостатного або механічного гальмування, коли генерована енергія утилізується гальмівними пристроями. Розв'язання зазначеної проблеми для системи електротягів на сьогодні реалізується за кількома напрямками, основними з яких є локалізація надлишкової енергії гальмування електротранспорту стаціонарними або бортовими накопичувачами, її передача через тягові підстанції (ТП) в живлячу енергосистему або на суміжні міжпідстанційні зони до віддалених тягових навантажень. В роботі розглядається ефективність передачі рекуперативної енергії електротранспорту до мереж зовнішнього електропостачання.

Огляд літератури

Питання підвищення ефективності використання енергії рекуперації електротранспорту в умовах зростання обсягів тягового електроспоживання та цін на енергоносії суттєво загострюються. Проблеми передачі енергії в тягову мережу у разі електричного гальмування електротранспорту розглядалися неодноразово [1—10], проте до сьогодні вирішені частково. Неможливість синхронізації процесів генерування і споживання енергії різними одиницями електротранспорту вимагає пошуку технічних та організаційних заходів підвищення ефективності використання енергії рекуперації.

Особливістю режиму рекуперації на електрифікованому транспорті є його суттєва залежність від рівня напруги в тяговій мережі, що визначається двома основними факторами:

1. режим тягового електроспоживання в зоні рекуперації;
2. режим напруги на шинах суміжних ТП.

Одним з варіантів вирішення цієї проблеми в системі тяги постійного струму є передача надлишкової рекуперативної енергії електротранспорту з тягової мережі до живильної енергосистеми. В такому разі у періоди дефіциту тягового навантаження реверсивні ТП постійного струму перемикаються з випрямного режиму на інверторний [5]. При цьому забезпечується обмеження напруги в тяговій мережі і на струмоприймачі рекуперативного навантаження в допустимих межах [10—12]. Однак треба зауважити, що такий підхід до розв'язання зазначеної проблеми володіє і певними недоліками [7, 8], а саме:

- ускладнення обладнання ТП;
- короткочасний характер генерованої потужності (особливо на міському електротранспорті і метрополітенах);
- перетік енергії по тяговій мережі за нерівності напруг на шинах суміжних ТП;
- низька якість енергії на виході інверторів;
- погіршення режимів живлення нетягових споживачів;
- підвищення напруги в тяговій мережі.

Для забезпечення якості енергії рекуперації згідно з вимогами ГОСТ 13109-97 необхідно значне вдосконалення і ускладнення обладнання ТП, що виконує прийом і передачу енергії в первинну енергосистему.

Метою роботи є експериментальне дослідження ефективності роботи інверторних ТП залізниць постійного струму у разі передачі енергії рекуперації до системи зовнішнього електропостачання.

Результати дослідження

Умовою переходу неавтономного електротранспорту у разі електричного гальмування в режим рекуперації є

$$U_{\text{км}}(t) < U_{\text{с}}(t) < U_{\text{с}}^{\text{max}}, \quad (1)$$

де $U_{\text{км}}(t)$, $U_{\text{с}}(t)$, $U_{\text{с}}^{\text{max}}$ — відповідно, напруги в контактній мережі, на струмоприймачі транспортного засобу і граничнодопустима напруга на струмоприймачі (в тяговій мережі) згідно з [11, 12].

Значення напруги $U_{\text{с}}^{\text{max}}$ визначається максимально допустимою напругою між колекторними пластинами тягових електродвигунів постійного струму у випадку їх прямого приєднання до тягової мережі, або максимальною напругою на виході перетворювача за безконтактного регулювання потужності.

За цієї умови забезпечується перетікання генераторного струму в мережу

$$I_{\text{рек}} = \frac{U_{\text{с}}(t) - U_{\text{км}}(t)}{\sum R}, \quad (2)$$

де $\sum R$ — еквівалентний опір контуру струму рекуперації.

Режим рекуперації в системі електричної тяги супроводжується збільшенням напруги на струмоприймачі рекуперативного поїзда і в тяговій мережі, що особливо проявляється в умовах обмеженого тягового електроспоживання в зоні рекуперації. За наявності інверторів на ТП постійного струму режим напруги в тяговій мережі може бути поліпшено передачею енергії гальмування в мережу середньої (високої) напруги за умови, що її приймання узгоджене як в технічному так і комерційному аспектах, таких як:

- максимально допустима короткочасна потужність, що приймається мережею;
- прийнятні гармоніки;
- готовність обленерго до рефінансування.

У вітчизняному секторі електропостачання неавтономного електротранспорту інвертуючими ТП на сьогодні обладнані лише деякі гірські ділянки Львівської залізниці з затяжними ухілами (до 30 %). Ці ТП постійного струму з інверторами забезпечують передачу надлишкової рекуперативної енергії поїздів з тягової мережі постійного струму (3,3 кВ) до живильної мережі змінного струму (110 кВ). Оскільки ці ділянки рекуперації є протяжними (10...12 км), то за існуючих швидкостей руху поїздів режими рекуперації є достатньо тривалими і робота інверторів на ТП може вважатись усталеною. Вмикання інверторів відбувається коли напруга на шинах ТП сягає відповідного значення уставки, що для ТП досліджуваних ділянок складає 3550...3600 В.

Для аналізу ефективності роботи інверторних перетворювачів ТП постійного струму на Львів-

ській залізниці проведені синхронізовані вимірювання параметрів енергії рекуперації одночасно на двох суміжних ТП і рухомому по ділянці між ними поїзді в режимі рекуперації (інших споживачів на дослідній ділянці не було). Для дослідження обрана двоколійна міжпідстанційна зона Скотарське—Воловець, оскільки в напрямку ст. Воловець на ділянці ухил (спуск) сягає 28,4 ‰ і з метою обмеження швидкості поїздів є обов'язковим для використання електричного гальмування. Під час виконання вимірювань на ТП застосовані аналізатори якості електроенергії EDL-175, PNA-296. Для вимірювань в силових колах електровоза постійного струму розроблені вимірювальні комплекти з оптичним та радіо-канальним розв'язками з використанням мікроконтролерів ATmega128A3, ATmega128RFA1 та оптичних прийомо-передавачів HFBR-2521 / HFBR-1521 [13]. Загальна схема проведення вимірювань показана на рис. 1.

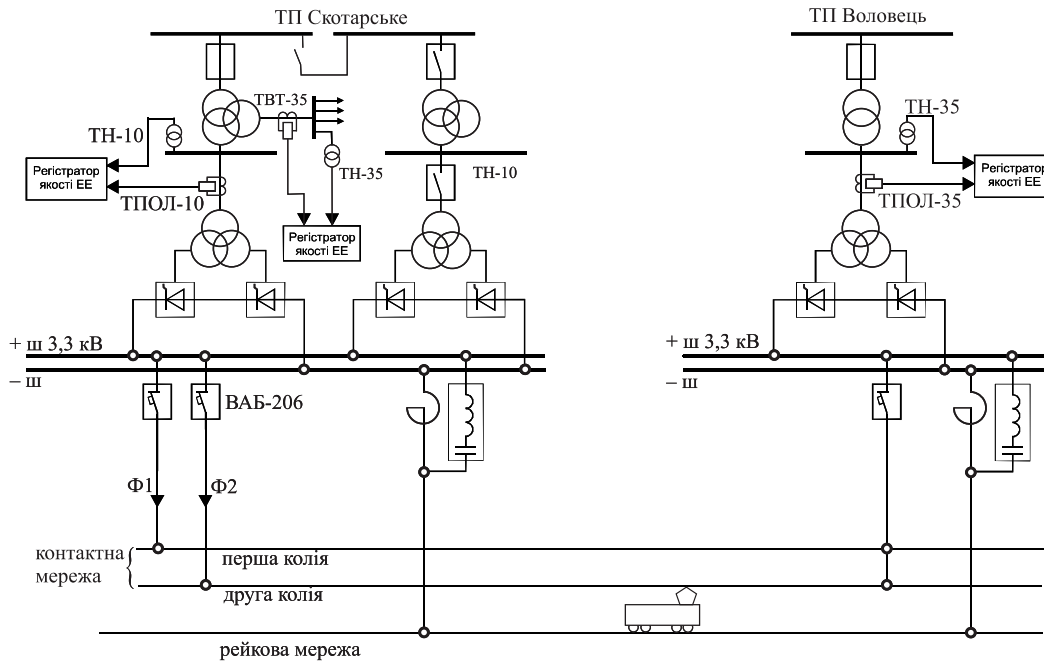


Рис. 1. Загальна схема проведення експериментальних вимірювань

Схема приєднання розроблених вимірювальних пристроїв до силових кіл електровозу ВЛ11М приведена на рис. 2. Зовнішній вигляд дільника напруги з пристроєм узгодження та макетною платою радіопередавача ATmega128RFA1 зображено на рис. 3.

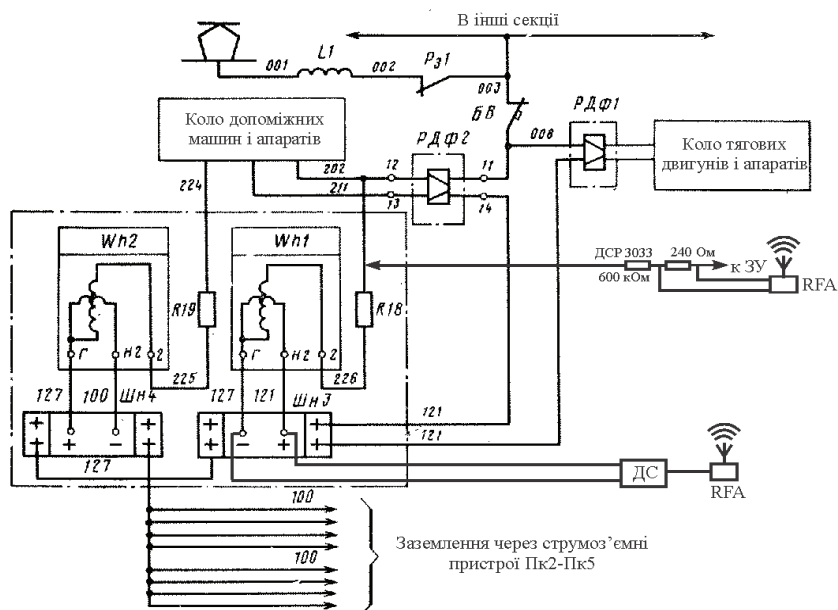


Рис. 2. Схема підключення вимірювальних пристроїв до силових кіл електровозу

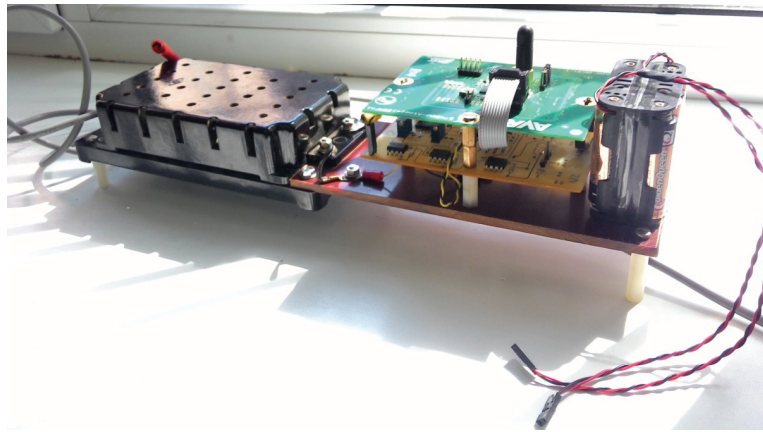


Рис. 3. Зовнішній вигляд розробленого пристрою для вимірювання напруги в мережі 3,3 кВ

Напередодні проведення основного експерименту проведені пробні вимірювання на ділянці Клепарів—Стрий—Ходорів та у зворотному напрямку. Ця ділянка особлива консольним живленням тягової мережі у одноколіїному напрямку ст. Ходорів, під час руху якою спостерігались зниження напруги нижче 3,0 кВ. Для цього випадку зафіксоване значення напруги величиною 2727 В при загальному струмі електровозу 506 А. Результати вимірювань параметрів електроспоживання (напруги на струмоприймачі і струму в режимах тяги, вибігу і рекуперації) електровоза ВЛ11М на дослідних ділянках показані на рис. 4, 5.

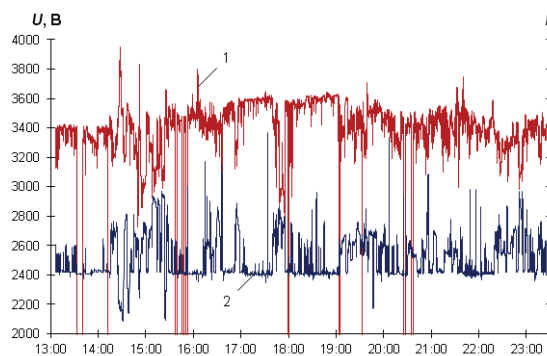


Рис. 4. Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М в напрямку Клепарів—Стрий—Ходорів:

1 — напруга на струмоприймачі; 2 — тяговий струм (рекуперація коли струм $I < 0$)

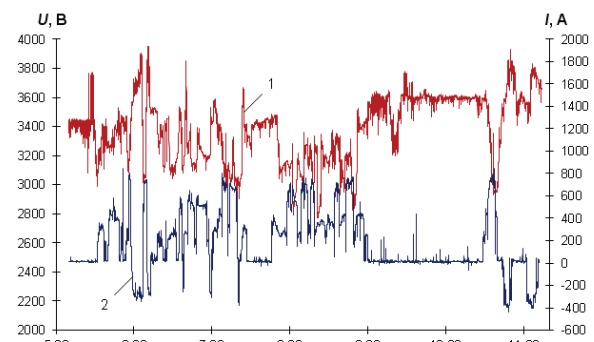


Рис. 5. Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М на ділянці Клепарів—Стрий—Воловець:

1 — напруга; 2 — струм (рекуперація коли струм $I < 0$)

Попередній аналіз отриманих результатів показав, що для нормально встановленої схеми живлення режим напруги в тяговій мережі відповідав встановленим вимогам. Мінімальне значення напруги для двосторонньої схеми складало 2770 В у режимі тяги за загального струму електровоза 1220 А.

Найвище значення напруги на струмоприймачі зафіксоване в режимі рекуперації, яке складає 3947,7 за загального струму рекуперації електровоза 760 А.

Зіставлення потужності дослідного електровоза з потужностями двох суміжних ТП по стороні змінного струму (на вводах 35 кВ тягових трансформаторів), які характерно відображають перехід перетворювачів ТП з випрямного в інверторний режим показані на рис. 6.

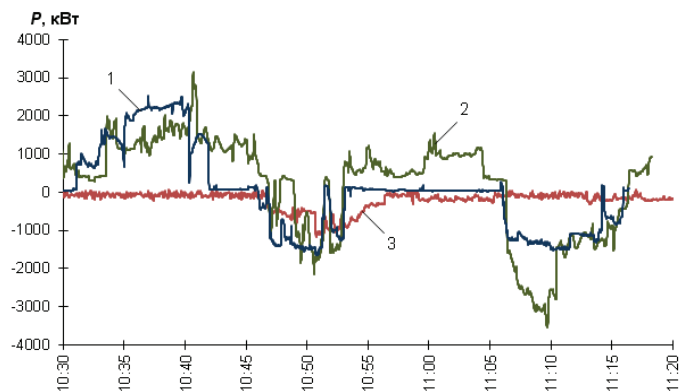


Рис. 6. Зіставлення потужностей дослідного електровоза та тягових підстанцій: 1 — дослідний електровоз; 2 — ТП Воловець; 3 — ТП Скотарське

Для приєднань на ТП не зафіксовано значних порушень вимог щодо рівня напруги. Максимальне значення потужності, яка генерувалась зі сторони тягового навантаження, зафіксована на рівні 1100 кВт для однієї підстанції і на рівні 3000 кВт для іншої. В інверторному режимі роботи тягової підстанції спостерігалось загальне підвищення коефіцієнта сумарних гармонійних спотворень, що є технологічною особливістю роботи тиристорного інвертора. В табл. наведені значення основних показників якості енергії рекуперації, виміряні зі сторони живлячої мережі 35 кВ.

Основні показники якості електроенергії в режимі рекуперації

Показники по напрузі	Значення	Показники по струму	Значення
Відхилення, %	9,38	Гармонічні спотворення, %	20,8
Гармонічні спотворення, %	3,8	в т. ч. непарними, %	20,7
в т. ч. непарними, %	3,1	парними, %	1,8
парними, %	0,3	інтергармоніками, %	0,6
інтергармоніками, %	0,2	Коефіцієнт амплітуди	1,55
Несиметрія, %	0,5	Коефіцієнт форми	1,09
Частота, Гц	50,0	Несиметрія, %	1,39

Аналіз регістрограм потужності суміжних ТП (див. рис. 6) і положення рекуперативного поїзда між ними свідчить про нерівномірний розподіл потужності рекуперації по відповідним ТП. Зокрема спостерігалася передача 75...80 % енергії рекуперації через віддалену ТП, що знаходилася на відстані до електровоза близько 90 % довжини міжпідстанційної зони (проміжок часу 10:45...10:55). В такому разі вплив на режими роботи інвертуючих ТП може здійснювати живляча мережа, тобто її режим напруги (завантаження). Також зафіксовано, що на цих ділянках у разі рекуперації на струмоприймачі електровоза напруга сягала значення (3,95 кВ), за якого можливе порушення режиму рекуперації. В такому випадку це приводило до вимикання однієї секції електровоза з режиму рекуперації.

Крім того, в деяких випадках було зафіксовано, що сумарна потужність рекуперації на вводах суміжних ТП перевищувала потужність рекуперації поїзда (див. рис. 6, проміжок часу 11:05...11:15). Оскільки за технічними умовами проведення вимірів на досліджуваній ділянці інших поїздів графіком руху не передбачалося і рекуперація застосовувалась лише на одному електровозі, таке явище може пояснюватися лише перетоками енергії по тяговій мережі від сусідніх ТП (працюючих у випрямному режимі), що знаходилися за межами дослідної ділянки.

На рис. 7—9 показані осцилограми, які характеризують роботу ТП в інверторному режимі. Форми фазних напруг трифазної системи 35 кВ мають характерні спотворення, спричинені перехідними процесами під час комутації тиристорів при переходах між фазами інвертора.

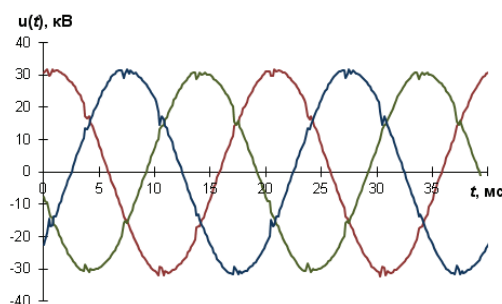


Рис. 7. Осцилограми фазних напруг в мережі 35 кВ

Первинні струми трифазного інвертора мають несиметричну форму, що наближається до ступінчастої 6-пульсної перетворювача. Симетрія між струмами різних фаз в цілому дотримується і не перевищує 1,4 %. Кут навантаження в інверторному режимі зафіксовано на рівні $-131,9^\circ$, що вказує на перетікання реактивної потужності через нестачу $48,1^\circ$ до повного протифазного режиму між струмом і напругою.

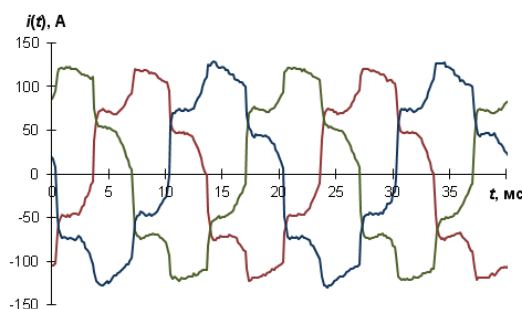


Рис. 8. Осцилограми фазних струмів в мережі 35 кВ

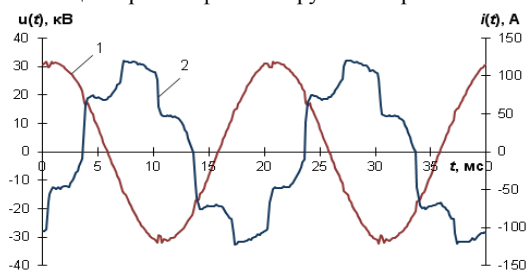


Рис. 9. Осцилограми напруги і струму в одній фазі мережі 35 кВ: 1 – напруга; 2 – струм

Висновки

На ділянках тягового електропостачання з інверторними ТП можливі порушення режимів рекуперації енергії за умовами граничнодопустимої напруги на струмоприймачі транспортних засобів. На ефективність перетоків надлишкової рекуперативної енергії з тягової мережі 3,3 кВ до живлячої мережі середньої (високої) напруги суттєвий вплив здійснює режим роботи живлячої енергосистеми, тобто за недостатнього її навантаження у вузлах приєднання ТП існує обмеження допустимого рівня напруги на виході інвертора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гетьман Г. К. Теория электрической тяги [Текст] / Г. К. Гетьман. — Д. : изд-во Маковецкий, 2011. — 456 с.
2. Сопов В. И. Способы повышения эффективности использования энергии электрического торможения подвижного состава [Электронный ресурс] / В. И. Сопов // Онлайн Электрик: Электроэнергетика. Новые технологии, 2012. — Режим доступа : URL: <http://www.online-electric.ru/articles.php?id=43>.
3. Тарута П. В. Повышение эффективности использования энергии рекуперации в системе тягового электроснабжения постоянного тока [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.07 / Павел Викторович Тарута. — Омск, 2004. — 23 с.
4. Вильгельм А. С. Повышение энергетической эффективности рекуперативного торможения на железных дорогах постоянного тока : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.07. / А. С. Вильгельм ; ОмГУПС. — Омск, 2013. — 20 с.
5. Пулін М. М. Проблеми перемикання тягової підстанції з випростувального режиму в інверторний і навпаки / М. М. Пулін, О. І. Скрипник // Вісник НУ «Львівська політехніка». — 2003. — № 497. — С. 161—165.
6. Саблін О. І. Анализ качества рекуперированной электроэнергии в системе электрического транспорта / О. И. Саблін // Вестник НТУ «ХПИ». — 2013. — Вып. 38. — С. 186—189.
7. Комякова О. О. Анализ качества электрической энергии, возвращаемой инверторами тяговых подстанций постоянного тока в сеть энергосистем / О. О. Комякова, А. А. Комяков, А. С. Вильгельм ; Омский гос. ун-т путей сообщения // Известия Транссиба. — 2012. — № 3 (11). — С. 71—77.
8. Сберегающие технологии тягового электроснабжения с рекуперацией энергии торможения поездов [Текст] / [А. Т. Бурков, В. М. Варенцов, А. Н. Марикин и др.] // II Евроазиатская конференция по транспорту : тез. докл. — С-Пб: ЦНИИТ СЭТ, 2000. — 93 с.
9. Босий Д. О. Баланс електричної енергії тягової підстанції постійного струму за різних рівнів несиметрії напруги системи зовнішнього електропостачання / Д. О. Босий, Д. Р. Земський // Східно-Європейський журнал передових технологій. Енергосберегающие технологии и оборудование. — 2014. — № 2/8 (68). — С. 52—57.
10. Сиченко В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць : монографія / В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий ; Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна. — Дніпропетровськ : Стандарт-Сервіс, 2015. — 344 с.
11. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений : ГОСТ 6962-75 — [Действует с 1977-01-01] — М. : Изд-во стандартов, 1976. — 3 с.
12. Напряжение питания тяговых железнодорожных сетей : Стандарт NF EN 50163-1996 — [Действует с 01.11.1996]. МКС 29.280, 1995. — 11 с.
13. Пат. 95871 Україна, МПК G01R 19/257, H04W 4/20. Пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних / Босий Д. О.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т заліз. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. — № U201408019 ; заявл. 16.07.14 ; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1. — 3 с.

Рекомендована кафедрою електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті

Стаття надійшла до редакції 25.12.2015

Саблін Олег Ігорович — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри електропостачання залізниць, e-mail: olegsss@i.ua;

Босий Дмитро Олексійович — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри електропостачання залізниць, e-mail: dake@i.ua;

Кузнецов Валерій Геннадійович — докт. техн. наук, професор, професор кафедри електропостачання залізниць, e-mail: vkuz@i.ua;

Баб'як Микола Олександрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Львівської філії, e-mail: babjak@mail.ru;

Косарєв Євген Миколайович — асистент кафедри електропостачання залізниць, e-mail: kossya@yandex.ua;

Губський Петро В'ячеславович — аспірант кафедри електропостачання залізниць, e-mail: Peter.gybbskiy@gmail.com.

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ

O. I. Sablin¹
D. O. Bosyi¹
V. G. Kuznetsov¹
M. O. Babiak¹
Ye. M. Kosariev¹
P. V. Hubskeyi¹

The Efficiency of Recuperation the Electric Power in Electric Transport System with Inverter DC Traction Substations

¹Dnipropetrovsk National University of Railway Transport Named after Academician V. Lazaryan

There have been presented the results of experimental study of the performance of inverter substations of electric traction system of direct current in the mode of recuperation. There has been found that inversion aimed to excess energy recovery of trains does not provide optimal distribution and proper mode voltage in the traction network, which requires the development of appropriate organizational and technical measures for the organization of train movement and traction power supply. Quality indicators of energy recovery at the connectors 35 kV traction substations are within the scope of maximum permissible values established by the standard.

Keywords: energy recovery, inverter substation, traction power supply, external power supply, voltage mode, power quality.

Sablin Oleh I. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Postdoctoral Student of the Chair of Power Supply of Railways, e-mail: olegsss@i.ua;

Bosyi Dmytro O. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Postdoctoral Student of the Chair of Power Supply of Railways, e-mail: dake@i.ua;

Kuznetsov Valerii G. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Chair of Power Supply of Railways, vkuz@i.ua;

Babiak Mykola O. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Transportation Technologies Department of the Lviv Branch, e-mail: babjak@mail.ru;

Kosariev Yevgen M. — Assistant of the Chair of Power Supply of Railways, e-mail: kossya@yandex.ua;

Hubskeyi Petro V. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Supply of Railways, e-mail: Peter.gybskiy@gmail.com

О. И. Саблин¹
Д. А. Босый¹
В. Г. Кузнецов¹
Н. А. Бабяк¹
Е. Н. Косарев¹
П. В. Губский¹

Эффективность рекуперации электроэнергии в системе электротранспорта с инверторными тяговыми подстанциями постоянного тока

¹Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

Приведены результаты экспериментального исследования эффективности работы инверторных подстанций системы тягового электроснабжения постоянного тока в режиме рекуперации энергии. Установлено, что инвертирование избыточной энергии рекуперации поездов не обеспечивает ее оптимальное распределение и надлежащий режим напряжения в тяговой сети, что требует разработки соответствующих организационных и технических мероприятий со стороны организации движения поездов и тягового электроснабжения. Показатели качества энергии рекуперации на присоединениях 35 кВ тяговых подстанций находятся в области предельно допустимых значений, установленных стандартом.

Ключевые слова: рекуперация электроэнергии, инверторные подстанции, тяговое электроснабжение, внешнее электроснабжение, режим напряжения, качество электроэнергии.

Саблин Олег Игоревич — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры электроснабжения железных дорог, e-mail: olegsss@i.ua;

Босый Дмитрий Алексеевич — канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры электроснабжения железных дорог, e-mail: dake@i.ua;

Кузнецов Валерий Геннадиевич — докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения железных дорог, e-mail: vkuz@i.ua;

Бабяк Николай Александрович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры транспортных технологий Львовского филиала, e-mail: babjak@mail.ru;

Косарев Евгений Николаевич — ассистент кафедры электроснабжения железных дорог, e-mail: kossya@yandex.ua;

Губский Петр Вячеславович — аспирант кафедры электроснабжения железных дорог, e-mail: Peter.gybskiy@gmail.com