

УДК 621.333.4

О. І. САБЛІН – к. т. н., доцент, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, olegsss@i.ua

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ СИСТЕМ ЗОВНІШНЬОГО
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕКУПЕРАЦІЇ
ЕНЕРГІЇ ЕЛЕКТРИФІКОВАНОГО ТРАНСПОРТУ**

Вступ

В умовах зростаючого енергодефіциту в країні та постійного зростання тарифів на енергоносії загострюється питання підвищення ефективності використання такого важливого резерву енергозбереження на електрифікованому транспорті як рекуперація електроенергії. За різними оцінками фахівців даний резерв оцінюють на рівні 10...15 % у магістральному русі, і 20...40 % у циклічному русі від електроенергії, втраченої на тягу.

Однак сьогодні можливості енергозбереження за рахунок рекуперації використовуються далеко не повністю. Останнім часом повернення електроенергії не перевищує 3 % від її споживання і щорічно знижується [1–3]. Два минулих десятиріччя цей показник сягав 5 % по мережі залізниць країни, і лише на ділянках постійного струму. Це пов'язано з незадовільним технічним станом систем рекуперативного складу парку рухомого складу і низькою ефективністю споживання енергії рекуперації в системах електричної тяги.

Один з варіантів розв'язання цієї проблеми базується на поверненні надлишкової енергії рекуперації з систем тягового електропостачання до первинної енергосистеми, що на ділянках постійного струму потребує на тягових підстанціях (ТП) інверторних перетворювачів.

Мета статті

Експериментальне дослідження впливу режимів систем зовнішнього електропостачання (СЗЕ) на ефективність процесу рекуперації енергії при її поверненні в живлячу енергосистему.

Огляд літератури

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.

Умовою переходу електрифікованого електротранспорту при електричному гальмуванні в режим рекуперації є [4]

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

де $U_{\text{км}}(t)$, $U_c(t)$, U_c^{max} – відповідно напруги в контактній мережі, на струмоприймачі транспортного засобу і граничнодопустима напруга на струмоприймачі (в тяговій мережі) згідно [5, 6]. Значення напруги U_c^{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 при безконтактному регулюванні.

За цієї умови забезпечується протікання генераторного струму в контактну мережу

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

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

При цьому режим рекуперації в системі електричної тяги викликає підвищення напруги в контактній мережі (рис. 1), що особливо проявляється в умовах обмеженого

тягового електроспоживання в зоні рекуперації. Тому на вантажонапружених ділянках з підвищеним на 10...15 % рівнем напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій має місце погіршення умов, а в деяких випадках неможливість рекуперації енергії по верхній межі умови (1).

При відсутності або зниженні у зоні рекуперації тягового навантаження відбувається зростання напруги на струмоприймачі рекуперативного поїзда, і по досягненні їм правої границі (1) рекуперація в мережу припиняється, а потяг переходить у режим реостатного або механічного гальмування, при якому енергія, що їм виробляється розсіюється в гальмівних пристроях.

На рис. 2 приведені реалізації напруги і струму приміського електропоїзда постійного струму ЕПЛ2Т на одній з ділянок Придніпровської залізниці.

Тут можна спостерігати часті неуспішні акти рекуперативного гальмування поїзда, припинення яких викликано досягненням напруги на струмоприймачі максимально допустимого значення (4,0 кВ) внаслідок відсутності в зоні рекуперації поїздів у режимі тяги. Крім цього ефективність режимів рекуперації істотно залежить від рівня напруги на шинах тягових підстанцій [7].

Застосування рекуперативного гальмування на поїздах ускладнює режими роботи систем тягового електропостачання (СТЕ), внаслідок значних генерованих потужностей при гальмуванні. У цьому випадку для здійснення рекуперативного гальмування необхідно виконати дві умови: мати низьку напругу на струмоприймачі рекуперативного ЕРС і приймач енергії рекуперації. У якості приймачів надлишкової енергії рекуперації в системі тяги постійного струму можуть служити потужні інверторні перетворювачі або накопичувачі на ТП.

Одним з варіантів розв'язання даної проблеми в системі тяги постійного струму є передача надлишкової рекуперативної енергії електротранспорту з тягової мережі до живлячої енергосистеми. В такому разі у періоди дефіциту тягового навантаження реверсивні ТП постійного струму переми-

каються з випрямляючого режиму на інверторний [8]. При цьому забезпечується обмеження напруги в тяговій мережі і на струмоприймачі рекуперативного навантаження в допустимих межах [5–7]. Однак треба зауважити, що такий підхід до розв'язання зазначеної проблеми володіє і певними недоліками [8–11], а саме:

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

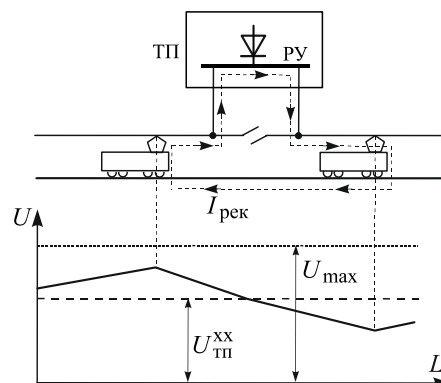


Рис. 1. Режим напруги в контактній мережі при наявності на ділянці рекуперації

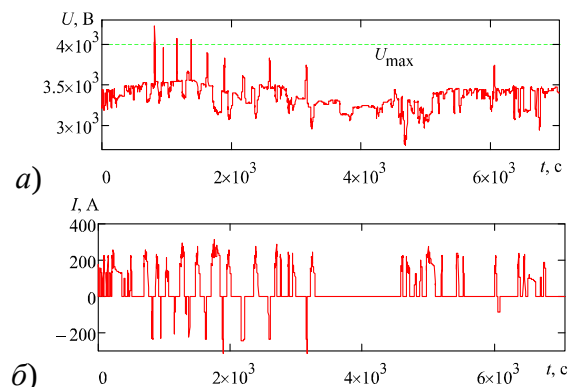


Рис. 2. Часові діаграми напруги на струмоприймачі (а) та тягового струму (б) електропоїзда постійного струму ЕПЛ2Т

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

Отже при наявності інверторів на ТП постійного струму режим напруги в тяговій мережі може бути поліпшено за рахунок передачі енергії гальмування в мережу середньої (високої) напруги за умови, що її прийом узгоджений як в технічному так і комерційному аспектах, таких як:

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

Основний матеріал

В Україні системи тягового електропостачання електрифікованого транспорту постійного струму, що можуть повертати надлишкову енергію рекуперації до живлячих мереж є лише на деяких гірських ділянках Львівської залізниці з затяжними ухилами (до 30 ‰). Дані ТП постійного струму з інверторами забезпечують передачу надлишкової рекуперативної енергії поїздів з тягової мережі постійного струму (3,3 кВ) до живлячої мережі змінного струму (10, 35 кВ). Оскільки ці ділянки рекуперації є протяжними (10...12 км), то при існуючих

швидкостях 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 Львівській залізниці були 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 була обрана двоколійна міжпідстанційна зона Скотарське-Воловець, оскільки в напрямку ст. Воловець на ділянці ухил (шкідливий спуск) сягає 28,4 ‰ і з метою обмеження швидкості поїздів є обов'язковим для використання електричного гальмування. При виконанні вимірювань на ТП застосовані аналізатори якості електроенергії EDL-175, PNA-296. Для вимірювань в силових колах електровозу постійного струму розроблені вимірювальні комплекти з оптичною та радіо-канальною розв'язками з використанням мікроконтролерів ATxmega128A3, ATmega128RFA1 та оптичних прийомо-передавачів HFBR-2521 / HFBR-1521 [12]. Загальна схема проведення вимірювань приведена на рис. 3.

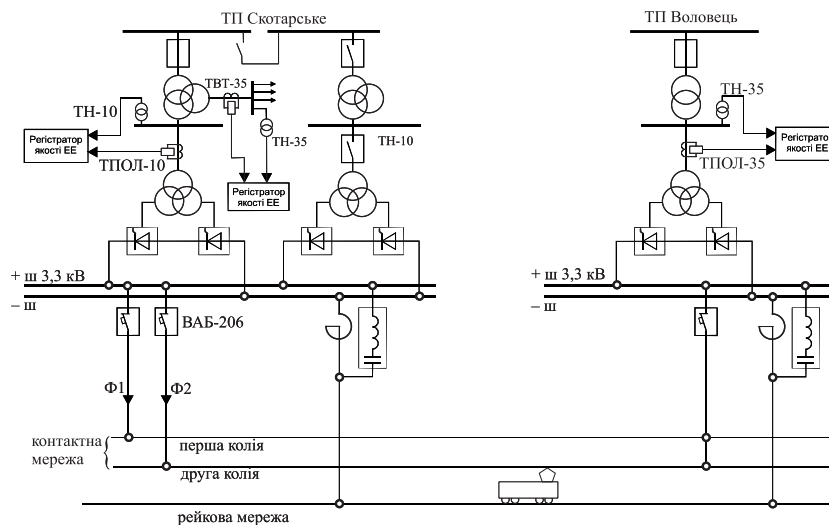


Рис. 3. Загальна схема проведення експериментальних вимірювань

Результати вимірювань параметрів електроспоживання (напруги на струмоприймачі $U_c(t)$ і струму в режимах тяги, вибігу і рекуперації $I(t)$) електровоза ВЛ11М на дослідній ділянці приведено на рис. 4.

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 при загальному струмі електровозу 1220 А.

Найвище значення напруги на струмоприймачі зафіксоване в режимі рекуперації, яке складає 3947 В при загальному струмі рекуперації електровозу 760 А.

Треба зазначити, що навіть за умови обладнання ТП постійного струму ІА на таких ділянках не може гарантовано забезпечуватися стовідсоткове споживання надлишкової енергії рекуперації $\Delta W_{\text{рек}}$, оскільки здатність системи зовнішнього електропостачання до прийому енергії $\Delta W_{\text{рек}}$ в значній мірі залежить від поточного завантаження СЗЕ нетяговими споживачами у вузлах приєднання ТП. Оскільки енергосистема країни на сьогодні є недовантаженою і напруги на приєднаннях ТП (10, 35, 110, 220 кВ) переважно тримаються на верхній межі, а часто перевищують її [13], то ефективність і власне можливість споживання надлишкової енергії рекуперації системою зовнішнього електропостачання може бути обмеженою.

Часові діаграми потужності дослідного електровозу, потужностей двох суміжних ТП по стороні змінного струму та діючих значень напруг на вводах 10 та 35 кВ тягових трансформаторів, що отримані синхронно при проходженні дослідного електровозу по відповідній міжпідстанційній зоні Скотарське-Воловець приведені на рис. 5.

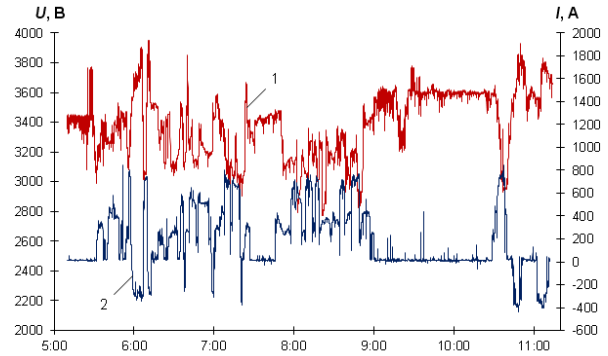


Рис. 4. Параметри електроспоживання електровоза ВЛ11М на ділянці Клепарів-Стрий-Воловець: 1 – напруга; 2 – струм (рекуперація при струмі $I < 0$)

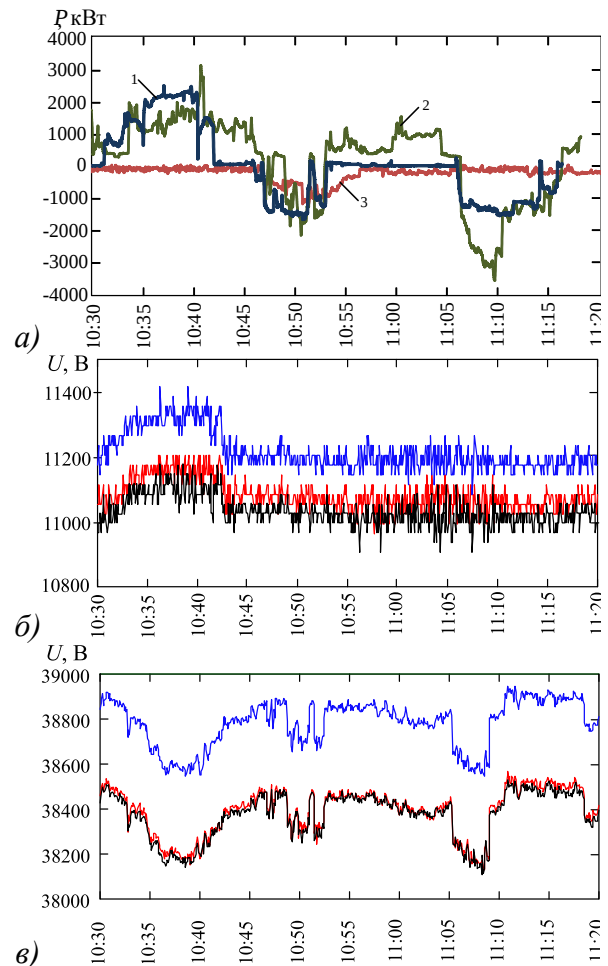


Рис. 5. Часові діаграми потужностей дослідного електровозу та суміжних ТП (1 – дослідний електровоз; 2 – ТП Воловець; 3 – ТП Скотарське) (а), а також лінійних напруг на вводі ТП Скотарське (б) і Воловець (в)

На рис. 5 а характерно відображено моменти переходу перетворювачів ТП з випрямного на інверторний режим. Аналіз регістрограм потужності суміжних ТП і положення рекуперативного електровоза 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 даних ділянках при рекуперації на струмоприймачі електровоза напруга сягала значення (3,95 кВ), при якому можливе порушення режиму рекуперації. В даному випадку це приводило до вимикання однієї секції електровозу з режиму рекуперації.

Крім того, в деяких випадках було зафіксовано, що сумарна потужність рекуперації на вводах суміжних ТП перевищувала потужність рекуперації поїзда (рис. 5 а, 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, дане явище може пояснюватися лише перетоками енергії по тяговій мережі від сусідніх ТП (працюючих у випрямному режимі), що знаходилися за межами дослідної ділянки.

Первинні струми трифазного інвертора мають несиметричну форму (рис. 6), що наближається до ступінчастої 6-пульсного 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.

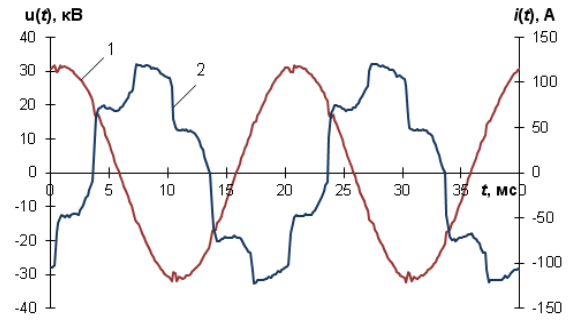


Рис. 6. Осцилограми напруги і струму в одній фазі мережі 35 кВ:
1 – напруга; 2 – струм

При роботі ТП в режимі видачі енергії на живлячу мережу 10 (35) кВ має місце зниження рівня напруги на вводі ТП, що пояснюється на неповною протифазою фазних струмів і напруг на вводах тягового трансформатора та споживанням значної реактивної потужності при цьому.

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 ТП спостерігалось загальне підвищення коефіцієнта сумарних гармонійних спотворень, що є технологічною особливістю роботи тиристорного інвертора. В табл. 1 наведені значення основних показників якості енергії рекуперації, виміряні зі сторони живлячої мережі 35 кВ.

Висновки

На ділянках тягового електропостачання з інверторними ТП можливі порушення режимів рекуперації енергії за умовами граничнодопустимої напруги на струмоприймачі транспортних засобів, оскільки на ефективність перетоків надлишкової рекупераційної енергії з тягової мережі 3,3 кВ до живлячої мережі середньої (високої) напруги суттєвий вплив здійснює режим роботи живлячої енергосистеми, що проявляється при недостатньому рівні її навантаження у вузлах приєднання ТП.

Таблиця 1

Основні показники якості електроенергії в режимі рекуперації

Показники по напрузі	Значення	Показники по струму	Значення
Відхилення, %	9,38	Гармонійні спотворення, %	20,8
Гармонійні 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

Бібліографічний список

- Щербак, Я. В. Аналіз застосування рекупративного гальмування на залізницях України / Я. В. Щербак, В. П. Нерубацький // Залізничний транспорт України. – 2011. – № 2. – С. 30–34.
- Сергієнко, М. І. Основні напрямки роботи Укрзалізниці з енергозбереження та її результати / М. І. Сергієнко // Локомотивинформ. – 2010. – № 4. – С. 24–26.
- 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>.
- Гетьман, Г. К. Теория электрической тяги / Г. К. Гетьман. – Д: Изд-во Маковецкий, 2011. – 456 с.
- Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений: ГОСТ 6962-75 – [Действует с 1977-01-01] – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 3 с.
- Напряжение питания тяговых железнодорожных сетей: Стандарт NF EN 50163-1996 – [Действует с 01.11.1996]. МКС 29.280, 1995. – 11 с.
- Sychenko, V. G. Improving the quality of voltage in the system of traction power supply of direct current / V. G. Sychenko, D. O. Bosiy, E. M. Kosarev // The archives of transport. – 2015. – Vol. 35, Iss. 3. – PP. 63–70.
- Пулін, М. М. Проблеми перемикування тягової підстанції з випростувального режиму в інверторний і навпаки / М. М. Пулін, О. І. Скрипник // Вісник НУ «Львівська політехніка», № 497. – Львів, 2003. – С. 161–165.
- 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. – Омск, 2012. – № 3(11). – С. 71–77.
- Костін, Н. А. Якість електроенергії, рекуперованої електровозами ВЛ11М6 і ВЛ11М / Н. А. Костін, А. Н. Муха, А. В. Нікітенко // Електрифікація транспорту. – 2015. – № 10. – С. 108–116.
- Бурков, А. Т. Сберегающие технологии тягового электроснабжения с рекуперацией энергии торможения поездов : тез. док. / А. Т. Бурков, В. М. Варенцов, А. Н. Марикин и др. // II Евроазиатская конференция по транспорту. – С-Пб: ЦНИИТ СЭТ, 2000. – С. 93.
- Пристрій вимірювання напруги в мережі постійного струму з бездротовою передачею даних: Пат. 95871 Україна, МПК G01R 19/257, H04W 4/20 / Босий Д. О.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В. Лазаряна. – № U201408019; заявл. 16.07.14; опубл. 12.01.15, Бюл. № 1. – 3 с.

13. Сиченко, В. Г. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму / В. Г. Сиченко, Д. О. Босий // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Д., 2009. – Вип. 29. – С. 82–87.

Ключові слова: електротранспорт, тягове електроспоживання, електричне гальмування, рекуперація, енергозбереження.

Ключевые слова: электротранспорт, тяговое электропотребление, электрическое

торможение, рекуперация, энергосбережение.

Keywords: electric transport, tractive power consumption, electric braking, recuperation, energy saving.

Рецензенти:

д. т. н., проф. А. Б. Бойник,
д. ф.-м. н., проф. В. І. Гаврилюк.

Надійшла до редколегії 01.11.2016.

Прийнята до друку 09.11.2016.