

А. В. Нікітенко

(Україна, Дніпропетровськ, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна)

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ РЕКУПЕРОВАНОЇ НА ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ДІЛЯНКАХ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Рекуперативне гальмування, без сумніву, є технологічно зручним і необхідним режимом для роботи електрорухомого складу (ЕРС) залізниць. Переходячи в генераторний режим, електровоз генерує електричну енергію за рахунок накопиченої кінетичної енергії поїзда. При цьому відбувається плавне пригальмування ЕРС до необхідної технологічної швидкості. Повертаючи електричну енергію до тягової мережі, режим рекуперативного гальмування є економічно вигідним, а в умовах світової енергетичної та економічної криз – ще й стратегічним. Проте, процес забезпечення якості електричної енергії є не менш важливим фактором у даному випадку. Як відомо, якість електричної енергії сильно впливає на надійність і економічність роботи електричного обладнання. Погіршення її якості може призвести до завдання шкоди обладнанню споживачів (або виходу з ладу електричного обладнання), порушення роботи пристроїв автоматики, телемеханіки, зв'язку, електронної техніки, збільшення втрат самої електричної енергії, нерегламентованих змін технологічного процесу, зниження якості виготовленої продукції та ін. В окремих випадках якість енергії може впливати на безпеку та здоров'я людей [1].

Вимоги до якості електричної енергії на території України визначаються стандартом ГОСТ 13109-97 «Електрична енергія. Електромагнітна сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення» [2]. У Російській Федерації до нього додається ще й ГОСТ Р 53333-2008 «Електрична енергія. Електромагнітна сумісність технічних засобів. Контроль якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення» [3]. У той же час, вимоги до якості електричної енергії в країнах ЄС – більш жорсткі. Основним регламентуючим документом є EN50160 – оцінка якості напруги. У США – IEEE Std. 1159 195 «Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality» (Рекомендовані заходи з моніторингу якості електричної енергії). Важливим також є розділ у стандарті NFPA 70B «Electrical Equipment Maintain» (Обслуговування електричного обладнання) [4–8].

ГОСТ 13109-97 містить одинадцять критеріїв для оцінки показників якості електричної енергії. Він дозволяє чітко розподілити електричну енергію на ту, що відповідає нормам якості, та ту, яка цим нормам не відповідає. Ці критерії регламентують «нормально допустимі» та «гранично допустимі» норми якості електричної енергії, тобто допустимі відхилення напруги, частоти, гармонічного складу від номінальних значень. Потрібно відзначити, що ГОСТ 13109-97 встановлює критерії та норми в електричних мережах систем електропостачання загального призначення змінного однофазного та трифазного струмів з частотою 50 Гц. На сьогодні значна частина залізничного транспорту України, увесь шахтний, міський та кар'єрний електротранспорт живляться від тягової мережі постійного струму [9]. Тому актуальним буде визначення основних критеріїв та показників якості електричної енергії в тяговій мережі постійного струму в режимі рекуперації ЕРС.

Методи експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження необхідних величин і розрахунки енергетичних показників виконували для електровозів та електропоїздів постійного струму.

Як відомо, напруга та струм ЕРС у режимі рекуперації є випадковими функціями часу $U(t)$ та $I(t)$. Для оцінки якості електричної енергії на ділянці Нижньодніпровськ–Вузол Придніпровської залізниці було записано реєстрограми напруг $U(t)$ та струмів $I(t)$ в режимі рекуперації електровозів ВЛ8 (рис. 1) за допомогою програмно-апаратного комплексу для реєстрації напруг та струмів.

На Кримському відділенні дороги реєстрограми напруг та струмів у режимі рекуперації фіксували на електропоїздах ЕПЛ2Т (рис. 2). Здійснено також моніторинг напруг на тягових підстанціях (ТП) та на пунктах секціонування Кримського відділення дороги. Для цього було використано самописні вольтметри.

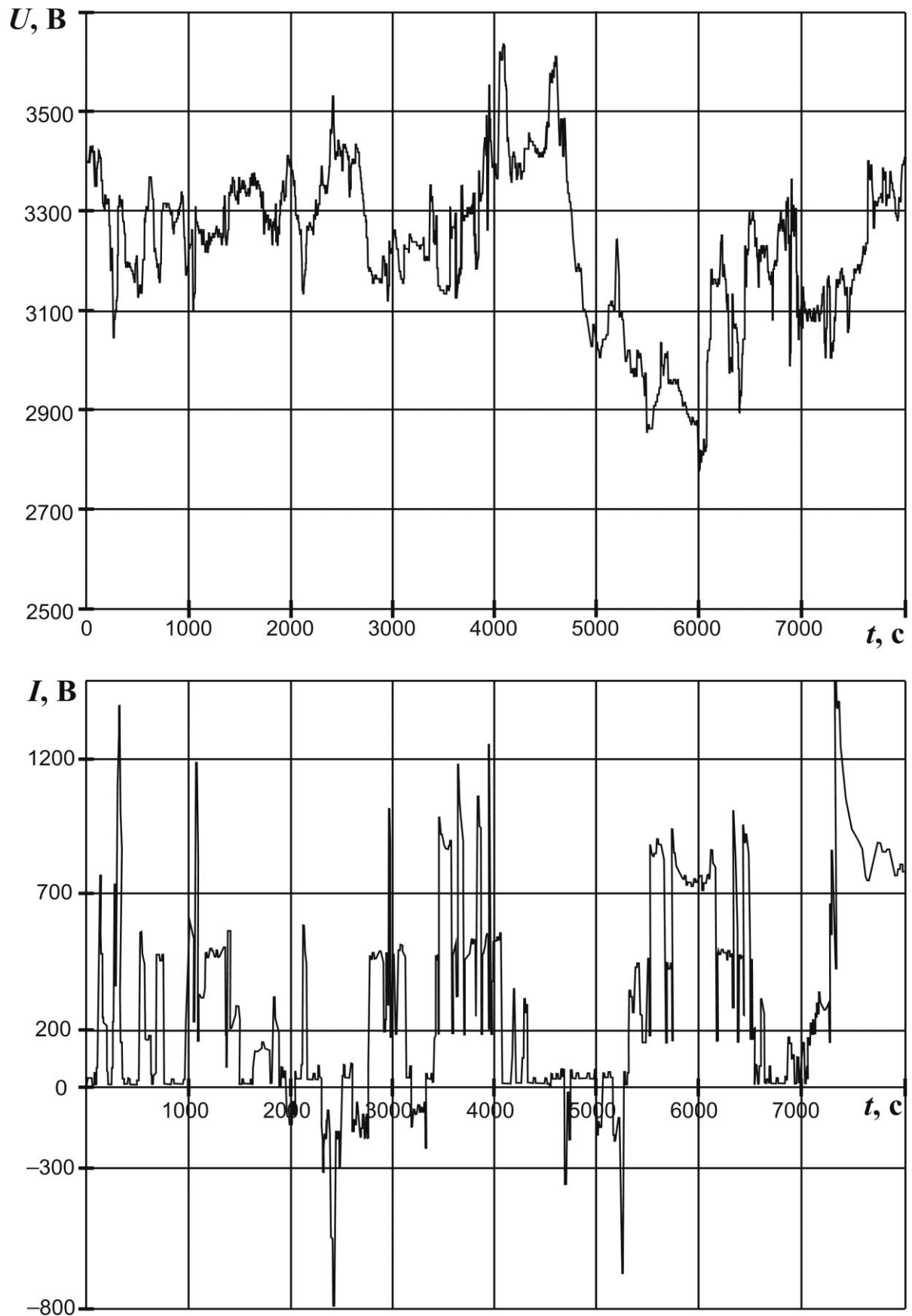


Рис. 1. Регістрограми напруги та струму на струмоприймачі електровоза ВЛ8 на ділянці Нижньодніпровськ–Вузол Придніпровської залізниці

Аналіз реєстрограм

Як відомо, основним документом, що регламентує роботу залізниць України, є «Правила технічної експлуатації залізниць України». У розд. 7 лише частково регламентовано роботу споруд та пристроїв електропостачання залізниць та встановлено для системи постійного струму тільки два поняття, що визначають найбільший та найменший рівні напруги в тяговій мережі. На відміну від ГОСТ 13109-97 тут відсутні критерії, за числовими значеннями яких можна зробити висновок про її відповідність нормам якості. Розглянемо ці два поняття більш детально.

Під *найбільшою напругою* розуміють найвище допустиме її значення на шинах ТП або на струмоприймачі ЕРС при будь-яких експлуатаційних умовах, за виключенням комутаційних режимів. Згідно з «Правилами технічної експлуатації залізниць України» найбільша напруга на шинах ТП та на струмоприймачі ЕРС не повинна перевищувати 3850 В на ділянках без рекуперативного гальмування. На ділянках з рекуперативним гальмуванням ця напруга не може перевищувати 4000 В. Номінальна напруга на шинах ТП має бути 3300 В, а на струмоприймачі ЕРС 3000 В.

Під *найменшою напругою* розуміють таке найнижче допустиме її значення на шинах ТП або на струмоприймачі ЕРС при будь-яких експлуатаційних умовах, за виключенням комутаційних режимів. Найменша напруга на струмоприймачі ЕРС не має бути нижчою за 2700 В. Проте для ТП найменша напруга не регламентується.

З реєстрограм випливає, що напруга на діючих ділянках Придніпровської залізниці у більшості випадків коливається в допустимих межах (наприклад, на рис. 1 від 2790 до 3620 В). Проте слід зазначити, що номінальна напруга на струмоприймачі електровоза була вищою за 3000 В і коливалась в межах 3100...3300 В, що не відповідає встановленим нормам. У режимі рекуперації найбільша напруга на струмоприймачі електровоза досягає 3400...3600 В, а найменша – коливається в межах 3000...3100 В. Іноді найменша напруга на пантографі електровоза в тяговому режимі становила 2800...2900 В, що також відповідає прийнятим нормам.

Результати аналізу реєстрограм напруг, записаних на Кримському відділенні дороги, гірші. Під час їх розшифровки було зафіксовано наступне:

- напруга в контактній мережі в середині підстанційних зон Поштова–Сірень, Сірень–Макензієві гори, Остряково–Ярково, тобто на відстані близько 10 км від тягових підстанцій, періодично протягом 2...3 хв збільшувалася до 4200 В, що викликано застосуванням рекуперації вантажними поїздами в цих зонах;
- один випадок короткочасного стрибка напруги до 4300 В у районі роз'їзду Сторожова.
- випадки зниження напруги в районі станцій Верхньосадова до 2500...2600 В, Самохвалово – 2400...2600 В і Сторожова – 2900 В при проходженні вантажних поїздів;

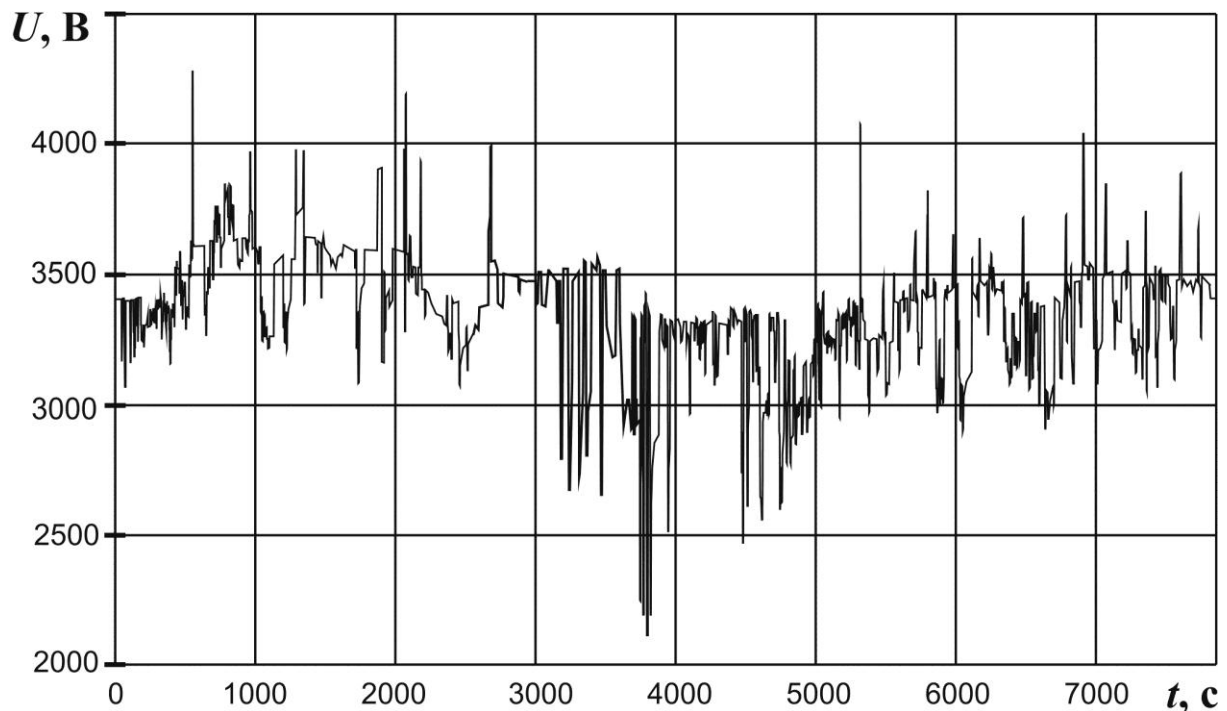


Рис. 2. Реєстрограми напруги на струмоприймачі електропоїзда ЕПЛ2Т на ділянці Сімферополь–Севастополь–Сімферополь

Енергозбереження та енергоефективність

- на тяговій підстанції Інкерман II підвищення напруги до 4150 В при застосуванні ЕРС рекуперації. При розділенні паралельного живлення зони Макензієві гори – Інкерман II і відсутності навантаження на підстанції Інкерман II напруга холостого ходу була 3850 В. Середня напруга на шинах тягової підстанції знаходилася в межах 3400...3550 В. Мінімальна напруга при проходженні вантажного поїзда за період запису зафіксована лише один раз і становила 2900 В;

- на тяговій підстанції Євпаторія максимальна напруга 3950 В спостерігалася лише один раз. При розділенні паралельного живлення на фідерній зоні Євпаторія–Саки за відсутності навантаження на підстанцію напруга холостого ходу становила 4200 В, середня напруга на шинах підстанції – 3500 В, а при проходженні поїздів не знижувалась за 3000 В.

Показники якості електричної енергії в режимі рекуперації

На жаль, визначити показники якості електричної енергії в режимі рекуперації ЕРС неможливо, оскільки стандартів, які б визначали основні критерії і допустимі межі коливання цих показників в Україні не існує. Для вирішення поставленої проблеми постає необхідність уведення деяких показників якості з ГОСТ 13109-97. Спробуємо визначити деякі з них.

Відхилення напруги визначають як відносну різницю між фактичним U та номінальним $U_{\text{ном}}$ значеннями напруги на шині ТП або на струмоприймачі ЕРС за формулою

$$\delta U_y = \frac{U_y - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де U_y – усереднене значення напруги на шині ТП або на струмоприймачі ЕРС за хвилину, В.

Згідно з ГОСТ 13109-97 нормально допустимі і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги δU_y становлять відповідно ± 5 та $\pm 10\%$.

У роботі [10] під відхиленням напруги на ТП пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка призводить до зміни швидкості ЕРС. При цьому слід розуміти відхилення додатнім, якщо $U_y > U_{\text{ном}}$ або від'ємним, якщо $U_y < U_{\text{ном}}$.

Усереднені значення напруг на струмоприймачі ЕРС та їх відхилення в режимі рекуперативного гальмування наведені в табл. 1. Як бачимо, максимальне відхилення напруги на струмоприймачі ЕРС у режимі рекуперації склало 43,33 %, а мінімальне –0,1 %.

Таблиця 1

№ п/п	Ділянки			
	Нижньодніпровськ–Вузол		Сімферополь–Севастополь	
	$U_y, \text{В}$	$\delta U_y, \%$	$U_y, \text{В}$	$\delta U_y, \%$
1	3410	13,67	3720	24
2	3530	17,67	3430	14,33
3	3070	2,33	3650	21,67
4	3350	11,67	4300	43,33
5	3180	6	3910	30,33
6	3270	9	3520	17,33
7	3440	14,66	3880	29,33
8	2997	-0,1	3990	33

Під коливаннями напруги розуміють швидку зміну напруг, яка відбувається зі швидкістю 1–2 % за секунду і більше. Автори роботи [10] під коливанням напруги в тяговій мережі пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка не призводить до зміни швидкості ЕРС. Коливання напруги характеризується амплітудою (розмахом) коливань та розраховується за формулою

$$\delta U_t = \frac{U_{\text{max}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Результати розрахунків коливань напруги на струмоприймачі ЕРС у режимі рекуперації зведені до табл. 2, із якої випливає, що мінімальне коливання напруги на ділянці Нижньодніпровськ–Вузол Придніпровської залізниці $\delta U_t = 0,67\%$, а максимальне $\delta U_t = 9,33\%$. На ділянці Сімферополь–Севастополь

Енергозбереження та енергоефективність

Кримського відділення дороги мінімальне коливання напруги $\delta U_t = 3,3 \%$, а максимальне $\delta U_t = 26,66 \%$.

Згідно з Європейським стандартом EN50160 допускається коливання напруги до $6 \dots 10 \%$ [10]. З табл. 2 видно, що в режимі рекуперації коливання напруги на струмоприймачі ЕРС на Кримському відділенні дороги європейським нормам не відповідають.

Таблиця 2

№ п/п	$U_{\max}, \text{В}$	$U_{\min}, \text{В}$	Колівання напруги на струмоприймачі ЕРС $\delta U_t, \%$
Нижньодніпровськ–Вузол			
1	3410	3320	3
2	3410	3290	4
3	3530	3332	6,6
4	3440	3380	2
5	3430	3150	9,33
6	3490	3250	8
7	3070	3050	0,67
8	3234	2997	7,9
Сімферополь–Севастополь			
9	4400	3600	26,66
10	3700	3500	6,66
11	3980	3590	13
12	4010	3500	17
13	3400	4100	23,33
14	3600	3300	10
15	3500	3400	3,3
16	3650	3400	8,33

Імпульс напруги $U_{\text{імп}}$ розглядають як максимальне значення напруги при її різкій зміні. При цьому тривалість фронту імпульсу не має бути більшою за 5 мс. Під імпульсом напруги розуміють різку зміну напруги в точці електричної мережі (у даному випадку між струмоприймачем та колією), після якої спостерігається відновлення напруги до попереднього значення. Імпульс напруги нормується її максимальним значенням. Тривалість імпульсу оцінюють виразом

$$\Delta t_{\text{імп}0,5} = t_{\text{к}0,5} - t_{\text{п}0,5}, \quad (4)$$

де $t_{\text{п}0,5}$, $t_{\text{к}0,5}$ – початковий та кінцевий моменти часу відповідно. Їх визначають як точки перетину кривої імпульсу напруги з горизонтальною лінією, проведеною на рівні половини амплітуди цього імпульсу, тобто на рівні $0,5 \cdot U_{\text{імп}}$.

Точно оцінити величину імпульсу для записаних реєстрограм неможливо. Це пов'язано з тим, що проміжок часу запису значень напруги на струмоприймачі дорівнює одній хвилині.

Тимчасова перенапруга $K_{\text{пер}U}$ розраховується за формулою

$$K_{\text{пер}U} = \frac{U_{\max}}{U_{\text{ном}}}. \quad (5)$$

Коефіцієнт тимчасової перенапруги характеризується тривалістю $\Delta t_{\text{пер}U}$. Для його визначення фіксують початковий момент часу $\Delta t_{\text{п.пер}}$ в точці перевищення напруги $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$, а також кінцевий момент часу $\Delta t_{\text{к.пер}}$ при спаданні напруги до значення $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$. Для визначення тривалості перенапруги користуються таким виразом:

$$t_{\text{пер}U} = t_{\text{к.пер}} - t_{\text{п.пер}}. \quad (6)$$

Результати розрахунків тимчасової перенапруги на струмоприймачі ЕРС у режимі рекуперації зведені в табл. 3, із якої випливає, що мінімальна перенапруга становить $K_{\text{пер}U} = 1,023$, а максимальна

$K_{перU} = 1,467$. На жаль, точно визначити тривалість тимчасової перенапруги неможливо, що обумовлено технологією запису реєстрограм.

Таблиця 3

№ п/п	Ділянки			
	Нижньодніпровськ–Вузол		Сімферополь–Севастополь	
	$U_{max}, В$	$K_{перU}, в.о.$	$U_{max}, В$	$K_{перU}, в.о.$
1	3410	1,137	4400	1,467
2	3360	1,12	3700	1,233
3	3530	1,177	3980	1,327
4	3440	1,147	4010	1,337
5	3330	1,11	3400	1,133
6	3490	1,163	3600	1,2
7	3070	1,023	3500	1,167
8	3234	1,078	3650	1,217

Оскільки реєстрація вимірів відбувалася з періодичністю в одну хвилину, то всі коефіцієнти, які розраховані в даній роботі, теоретично можуть приймати більші значення.

Висновки

1. На сьогодні використання рекуперативного режиму на залізничному транспорті України залишається перспективним напрямом для зниження собівартості перевезень та подальшого розвитку галузі. Однак не менш важливим є питання якості генерованої енергії [11]. Аналіз нормативної документації виявив, що в Україні не існує єдиного стандарту, за яким можна було б зробити висновок про якість рекуперованої енергії. Уведення додаткових показників дає можливість вирішити цю проблему, вдосконалити систему оцінювання показників якості електроенергії, достатньо точно оцінювати якість рекуперованої енергії, а головне – знайти шляхи підвищення електричної та економічної ефективності за рахунок застосування рекуперативного гальмування [12].

2. Наведений вище аналіз свідчить, що фактичні значення показників якості електроенергії для ЕРС постійного струму виходять за межі допустимих, а це, в першу чергу, призводить до додаткових її втрат не тільки в самому струмоприймачі ЕРС, але і в усіх елементах системи тяги. Аналіз реєстрограм, записаних на струмоприймачі ЕРС у режимі рекуперації та на шинах ТП, виявив, що на деяких ділянках залізниці застосування рекуперативного гальмування неможливе через значні коливання напруги, що призводить до спрацьовування системи захисту як на самому струмоприймачі ЕРС, так і на ТП.

Список літератури

1. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст] : учеб. пособие для вузов / Б. И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2005. – 672 с.
2. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения [Текст] : Введ.01.01.1999. – Минск : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации; М. : Изд-во стандартов, 1998. – 31 с.
3. Привалов, С. Я. Анализ электрических величин на токоприемнике электровоза в режимах тяги и рекуперации [Текст] / С. Я. Привалов // Научн. проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2009. – Вып. 1. – С. 308–311.
4. Working Group WG2: Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 4: Voltage unbalance. – IUE, 1998. – 168 p.
5. IEC Standard 61000-4-30. Power quality measurement methods, 2003. – 200 p.
6. IEC Standard 32(1). Machines électriques tournantes. Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement, 1983. – 246 p.
7. EMC Guide for public power supply networks compatibility levels and permissible emission. – VDEW, 1992. – 120 p.
8. Golovanov N. Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power System Supplying High Speed Railway [Text] / N. Golovanov, C. Lazaroiu, M. Roscia, D. Zaninelli // PES General Meeting 2005 (June 12-17). – San Francisco, USA, 2005, pp. 120-132
9. Жежеленко, И. В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
10. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Маквардт. – М. : Транспорт, 1982. – 582 с.
11. Yuruki Okada Energy Management for Regenerative Brakes on a DC Feeding System [Text] / Yuruki Okada, Takafumi Koseki, Satoru Sone // International Symposium on Speed-up and Service Technology for Railway and Maglev Systems STECH'2003 (2003.8.19-22). – Tokyo, Japan, 2003, pp. 84-88.
12. Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах общего назначения. Ч. 2. Анализ качества электрической энергии. РД 153-34.0-15.502-2002. – М. : ОРГРЭС, 2000. – 56 с.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Костієм М.О.