

*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, без сумніву, є економічно вигідним, а в умовах світової енергетичної та економічної криз – ще й стратегічним. Проте, забезпечення якості електричної енергії є не менш важливим фактором в 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 зі строю електричного обладнання), порушення роботи пристроїв автоматики, телемеханіки, зв'язку, електронної техніки, збільшенню втрат самої електричної енергії, нерегламентованим змінам технологічного процесу, зниженню якості випускаємої продукції і т. д. 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]. В 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]. В той же час, вимоги до якості електричної енергії в країнах ЄС більш жорсткіші. Основний регламентуючий документ це EN50160 – оцінка якості напруги. В США – IEEE Std. 1159 195 «Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality» (Рекомендовані заходи по моніторингу якості електричної енергії). Важливим являється також розділ в стандарті NFPA 70B «Electrical Equipment Maintain» (Обслуговування електричного обладнання) [4-8].

ГОСТ 13109-97 включає 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 і т.д. від номінальних значень. Потрібно відмітити, 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, весь шахтний, міський та кар'єрний електротранспорт живляться від тягової мережі постійного струму [9]. Тому актуальним є 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 в режимі рекуперації являються 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 в 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 самозаписуючі вольтметри.

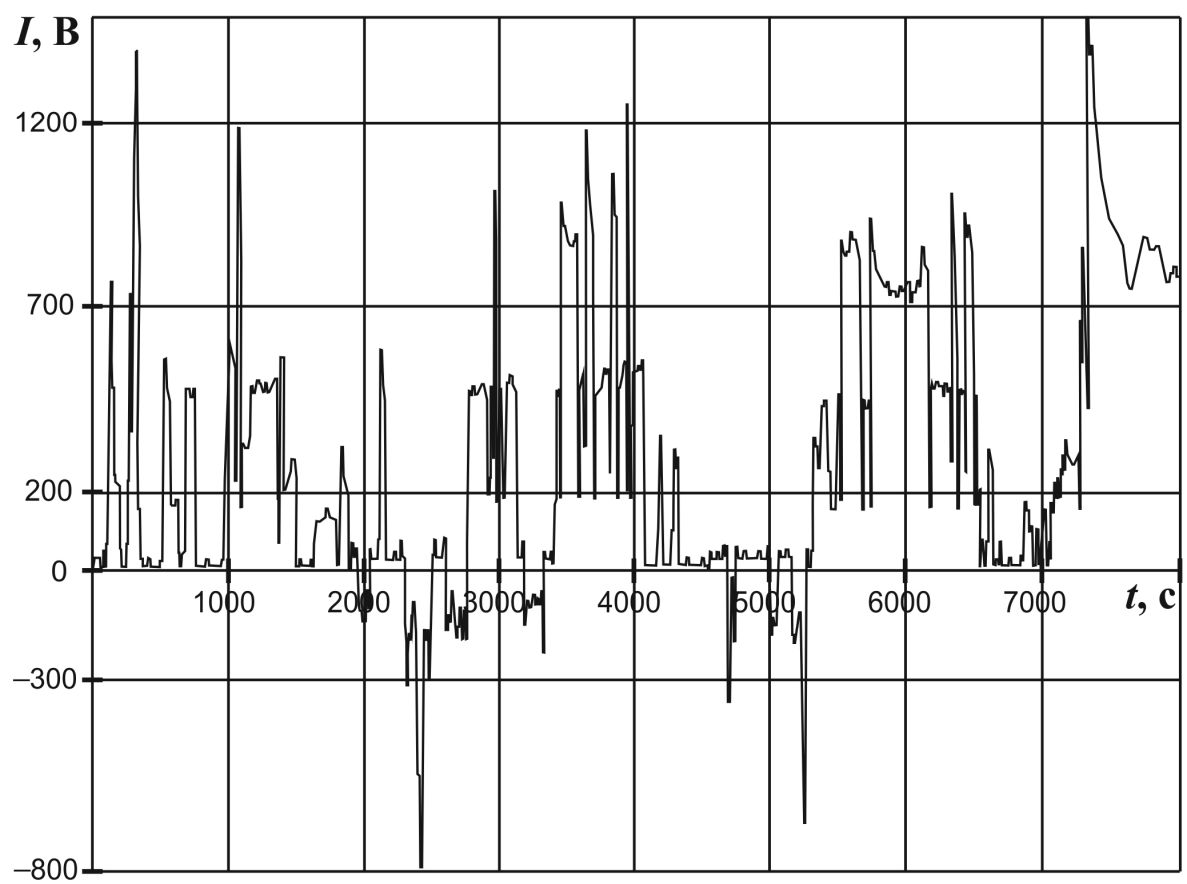
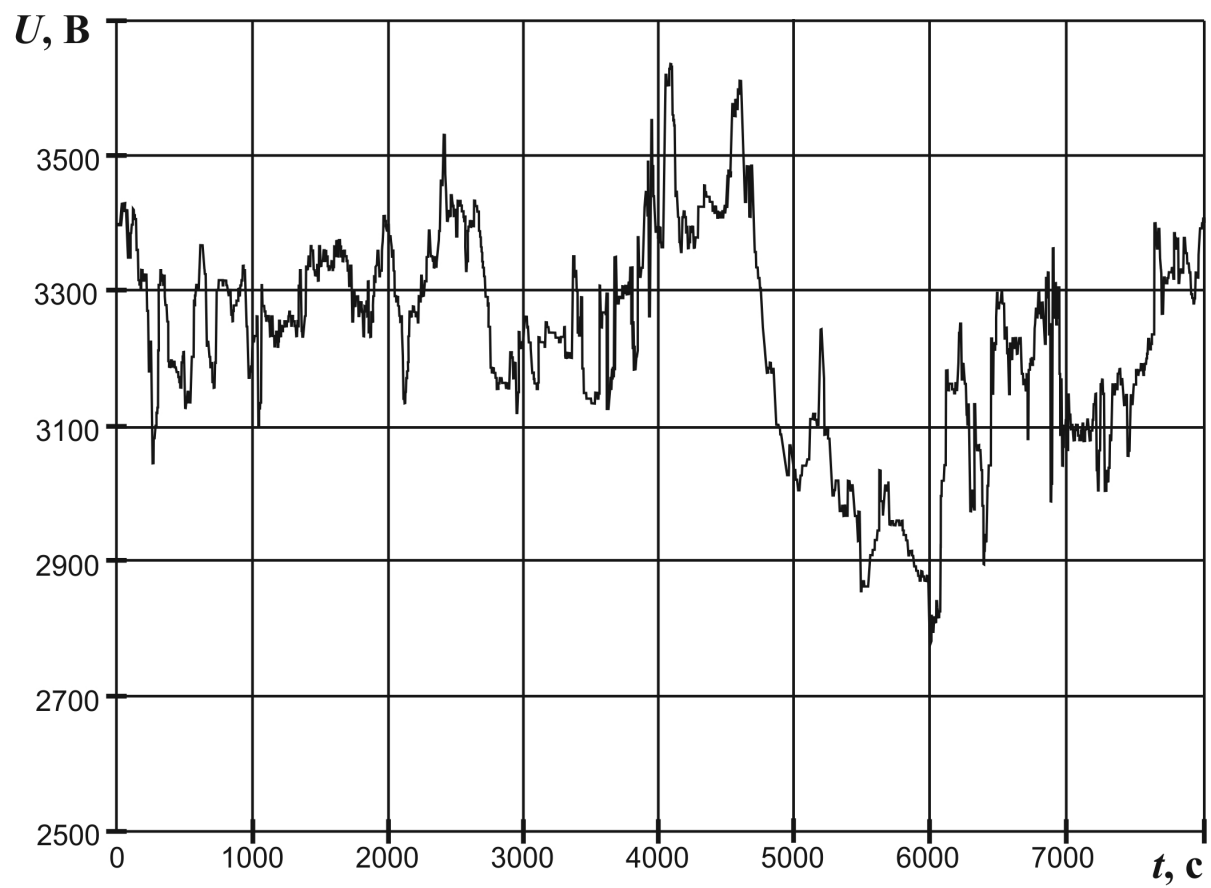


Рис.1. Регістрограми напруги та струму на струмоприймачі електровозу ВЛ8 на ділянці Нижньодніпровськ–Вузол Придніпровської залізниці

Аналіз реєстрограм

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

Під *найбільшою напругою* розуміють найбільше допустиме значення напруги на шинах ТП або на струмоприймачі ЕРС при будь-яких експлуатаційних умовах, за виключення комутаційних режимів. Згідно з «Правилами технічної експлуатації залізниць України» найбільша напруга на шинах ТП та 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 найменше 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 меншою за 2700 В. Проте для ТП найменша напруга не регламентується.

З реєстрограм випливає, що напруга на діючих ділянках Придніпровської залізниці в більшості випадків коливається в допустимих границях (наприклад, на рис. 1 від 2790 до 3620 В). Проте слід зазначити, що номінальна напруга на струмоприймачі електровозу була вищою 3000 В і коливалась в межах 3100...3300 В, що не відповідає встановленим нормам. В режимі рекуперації найбільша напруга на струмоприймачі електровозу досягає 3400...3600 В, а найменша – коливається в межах 3000...3100 В. В деяких випадках 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. В результаті їх розшифровки було зафіксовано наступне.

1. Напруга в контактній мережі в середині підстанційних зон Поштова–Сірень, Сірень–Макензієві гори, Остряково–Яркая, тобто на відстані близько 10 км від тягових підстанцій, періодично збільшувалась на 2...3 хв до 4200 В, що викликано застосуванням рекуперації вантажними поїздами в цих зонах.

2. Один випадок короткочасного стрибка напруги до 4300 В в районі роз'їзду Сторожеве.

3. Зафіксовані випадки зниження напруги в районі станції Верхнесадовая до 2500...2600 В, Самохвалово – 2400...2600 В і Сторожевого – 2900 В при проходженні вантажних поїздів.

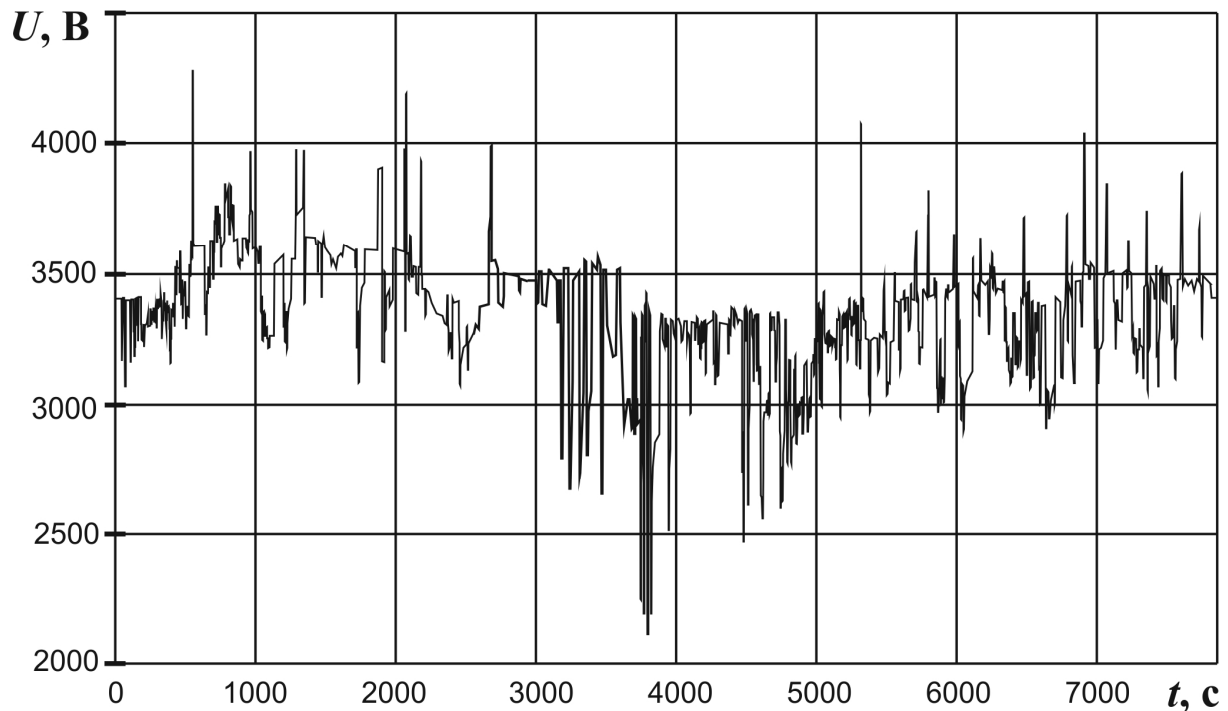


Рис.2. Регістрограми напруги на струмоприймачі електропоїзда ЕПЛ2Т на ділянці Сімферополь–Севастополь–Сімферополь

4. 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 знаходиться в межах 3400...3550 В. Мінімальна напруга при проході вантажного поїзда за період запису зафіксована лише один раз і становила 2900 В.

5. На тяговій підстанції Євпаторія максимальна напруга 3950 В зафіксована лише один раз. При розділенні паралельного живлення на фідерній зоні Євпаторія–Саки і відсутності навантаження на підстанції напруга холостого ходу становить 4200 В, середня напруга на шинах підстанції становить 3500 В і при проході поїздів менше 3000 В не знижується.

Показники якості електричної енергії в режимі рекуперації

Нажаль, визначити показники якості електричної енергії в режимі рекуперації ЕРС неможливо, оскільки стандартів, які б визначали основні критерії і допустимі межі коливання цих показників на 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 одну хвилину, В;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга на шині ТП або на струмоприймачі ЕРС, В.

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

В [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 приведені в табл. 1. Як впливає з табл. 1, максимальне відхилення напруги на струмоприймачі ЕРС в режимі рекуперації склало 43,33 %, а мінімальне –0,1 %.

Таблиця 1

№	Nyzhniodniprovsk–Vuzol		Simferopol–Sevastopol	
	U_{avaraged} [V]	$\delta U_{\text{deviation}}$ [%]	U_{avaraged} [V]	$\delta U_{\text{deviation}}$ [%]
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 швидкі зміни напруги, що протікають зі швидкістю 1-2 % за секунду і більше. В [10] під коливанням напруги в тяговій мережі пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка не призводить до зміни швидкості ЕРС. Коливання напруги характеризують амплітудою (розмахом) коливань та розраховують 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 в режимі рекуперації приведені в табл. 2, із якої випливає, що мінімальне коливання напруги на ділянці Нижньодніпровськ–Вузол Придніпровській залізниці $\delta U_t = 0,67$ %, а максимальне $\delta U_t = 9,33$ %. На ділянці Сімферополь–Севастополь Кримського відділення дороги мінімальне коливання напруги $\delta U_t = 3,3$ % та максимальне $\delta U_t = 26,66$ %.

Згідно з європейським стандартом EN50160, допускається коливання напруги до 6...10 % [10]. З табл. 2 випливає, що в режимі рекуперації коливання напруги на струмоприймачі ЕРС на Кримському відділенні дороги європейським нормам не відповідає.

Таблиця 2

№	U_{max} [V]	U_{min} [V]	Voltage Oscillation δU_t [%]
Nyzhniodniprovsk–Vuzol			
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
Simferopol–Sevastopol			
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 $U_{\text{імп}}$ вимірюють як максимальне значення напруги при її різкій зміні. При цьому тривалість фронту імпульсу не має бути більшою 5 мс. Під імпульсом напруги розуміють різку зміну напруги в точці електричної мережі (в даному випадку між струмоприймачем та колією), за яким слідує відновлення напруги до попереднього значення. Імпульс напруги нормується її максимальним значенням. Тривалість імпульсу оцінюють за 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 $0,5 \cdot U_{\text{імп}}$.

Точно оцінити величину імпульсу для записаних регістрограм неможливо. Це пов'язано з тим, що проміжок часу запису значень напруги на струмоприймачі дорівнює 1 хв.

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

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

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 спаді напруги до значення $1,1 \cdot U_{\text{ном}}$. Для визначення тривалості перенапруги користуються наступною формулою:

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

Результати розрахунків тимчасової перенапруги на струмоприймачі ЕРС в режимі рекуперації приведені в табл. 3, із якої випливає, що мінімальна перенапруга становить $K_{\text{пер}U} = 1,023$, а максимальна $K_{\text{пер}U} = 1,467$. Нажаль, точно визначити тривалість тимчасової перенапруги визначити неможливо, що обумовлено технологією запису регістрограм.

Таблиця 3

№	Nyzhniodniprovs'k–Vuzol		Simferopol–Sevastopol	
	U_{max} [V]	$K_{\text{Over}U}$ [r.u.]	U_{max} [V]	$K_{\text{Over}U}$ [r.u.]
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 відбувалась з періодичністю 1 хв, 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 напрямком для зниження собівартості перевезень та подальшого розвитку галузі. Однак, не менш важливим є питання якості генерованої енергії [11]. Аналіз нормативної документації показав, що в Україні не існує єдиного стандарту, за яким можна було зробити висновок про якість рекуперованої енергії. Введення 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 застосування рекуперативного гальмування [12].

2. Приведений вище аналіз показує, що фактичні значення показників якості електроенергії для ЕРС постійного струму виходять за границі допустимих меж, а це в першу чергу призводить до додаткових її втрат не тільки в самому ЕРС, але і в усіх елементах системи тяги. Аналіз регістрограм записаних на струмоприймачі ЕРС в режимі рекуперації та на шинах ТП показує, що на деяких ділянках залізниці застосування рекуперативного гальмування не можливе через значні коливання напруги, які призводить до спрацювання системи захисту як на самому 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 // Научные 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. – UIE, 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. Lazaroïu, 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. – 4-е изд., перераб. и доп. [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
10. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог [Текст] / К. Г. Марквардт. – 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. Часть 2. Анализ качества электрической энергии. РД 153-34.0-15.502-2002. М. : ОРГРЭС, 2000. – 56 с.

УДК 621.333.4-021.4

Показники якості електричної енергії рекуперованої на електрифікованих ділянках постійного струму / Нікітенко А. В. // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. – С.

Пропонується використовувати деякі критерії з ГОСТ 13109-97 для оцінки якості електричної енергії, що рекуперується на електрифікованих ділянках постійного струму. Проведена кількісна оцінка її якості. Виконано аналіз характеру зміни напруги на струмоприймачі електровозу ВЛ8 та електропоїзда ЕПЛ-2Т в режимі рекуперативного гальмування.

Предлагается использовать некоторые критерии с ГОСТ 13109-97 для оценки качества рекуперированной электрической энергии на электрифицированных участках постоянного тока. Проведена количественная оценка качества рекуперированной энергии. Выпол-

нен анализ характера изменения напряжения на токоприемнике электровоза ВЛ8 и электропоезда ЭПЛ-2Т в режиме рекуперативного торможения.