

М. О. КОСТИН, А. М. МУХА, А. В. НІКІТЕНКО (ДНУЗТ)

Кафедра «Електротехніка та електромеханіка», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, к. 238, Дніпропетровськ, 49010, Україна, тел. +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, andreemu@i.ua, nikitenko.diit@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0856-6397, 0000-0002-5629-4058, 0000-0002-6426-5097

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, РЕКУПЕРОВАНОЇ ЕЛЕКТРОВОЗАМИ ВЛ11М6 І ВЛ11М

Вступ

Ця робота являється продовженням і розвитком досліджень [1] з якості та спектрального складу рекуперованих напруги і струму на діючих ділянках магістральних залізниць.

Ступінь якості електричної енергії (ЯЕ) взагалі є важливою для її споживачів. Тому якість рекуперованої енергії треба аналізувати відносно точок 2-2' і 4-4' (рис.1). При цьому розглянемо два крайніх випадки.

Перший, коли вся енергія рекуперації споживається тяговими ЕРС, тоді треба аналізувати якість рекуперованої енергії відносно точок 2-2'. Другий – не вся енергія рекуперації споживається тяговим електрорухомим складом (ЕРС) і тоді її залишкову частину треба передати в ЛЕП зовнішнього електропостачання (і далі на районну підстанцію) шляхом перетворення її інверторними перетворювачами. В цьому випадку якість аналізується відносно точок 2-2' і 4-4'.

Як відомо, вимоги до якості електричної енергії на території України визначають стандартом ГОСТ 13109-97 «Електрична енергія. Електромагнітна сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення». В Російській Федерації до нього додається ще й ГОСТ Р 53333-2008 «Електрична енергія. Електромагнітна сумарність технічних засобів. Контроль якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення» [2]. 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) [3-7].

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» значення показників якості електричної енергії, тобто допустимі відхилення напруги, частоти, гармонічного складу і т. д. від нормованих величин. Потрібно зазначити, що ГОСТ 13109-97 встановлює критерії та норми в електричних мережах систем електропостачання загального призначення змінного однофазного та трифазного струмів частотою 50 Гц. В той же час тягові двигуни ЕРС постійного струму, якими є електровози ВЛ11М6 і ВЛ11М, генерують електроенергію постійних напруги і струму. Таким чином постає питання, яким критеріям (показникам) повинна відповідати енергія рекуперації. Для цього частково скористаємося рекомендаціями, приведеними в [8,9], згідно яких для оцінки якості електроенергії в мережах постійного струму необхідно застосовувати такі критерії як відхилення і коливання напруги. До цих показників додаємо такі показники як імпульс напруги і тимчасова перенапруга, що приведені в ГОСТ 13109-97 (табл. 1).

Методи і прилади експериментальних досліджень

Для оцінки енергетичних і якісних показників енергії рекуперації, що надходить до тягової підстанції і далі інвертується і віддається в зовнішню мережу, було проведено часову реєстрацію напруг і струмів на тяговій підстанції (ТП) Воловець Львівської залізниці в режимі рекуперативного гальмування завантаженого електровоза ВЛ11М на ділянці Воловець-Батьово. ТП Воловець обладнана двома інверторами, один з яких розроблено фірмою ESTEL AS, тип И-ПТП-М2,0к-3,8к-50-12-УЗ, на якому і виконувався моніторинг. На рис. 2 приведена схема вимірювання напруги та струмів системи керування інвертором.

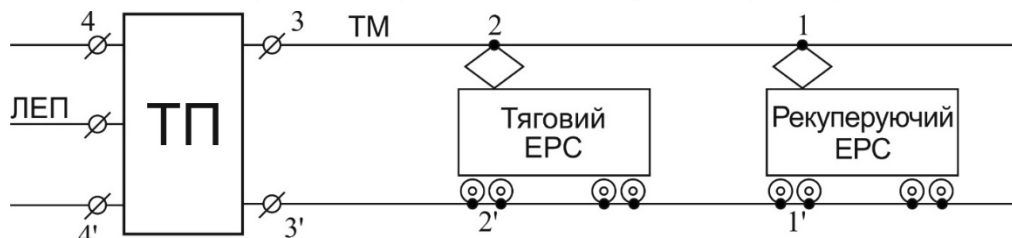


Рис. 1. Структурне розташування елементів електротяги на фідерній зоні в режимі рекуперації

Таблиця 1

Норми показників якості рекуперованої електроенергії

№ п/п	Властивості рекуперованої електроенергії	Показники якості рекуперованої енергії	Норми ЯЕ		Гранична відносна похибка вимірювання
			Нормально допустимі	Гранично допустимі	
1	Відхилення напруги	Усталене відхилення напруги $\delta U_y, \%$	± 5	± 10	---
2	Коливання напруги	Розмах зміни напруги $\delta U_t, \%$	---	---	± 8
3	Імпульс напруги	Імпульсна напруга $U_{\text{імп}}, \text{кВ}$	---	---	± 10
4	Тимчасова перенапруга	Коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}}U, \text{в.о.}$	---	---	± 10

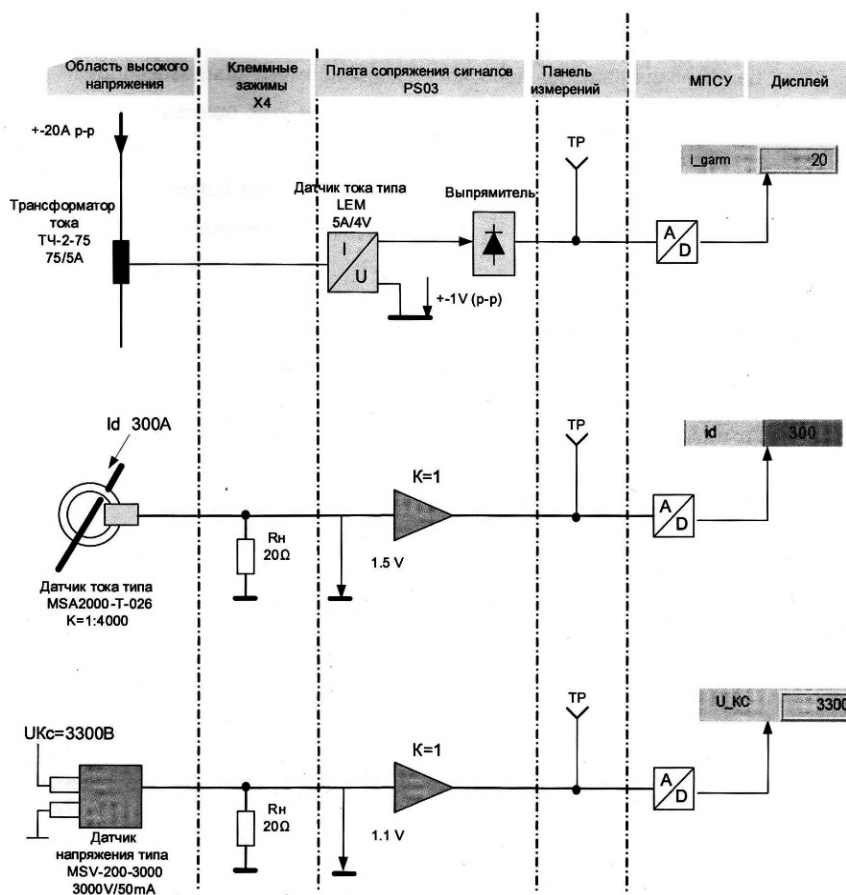


Рис. 2. Схема підведення вимірюваних струму та напруги до системи керування інвертором ТП Воловець Львівської залізниці

Система керування інвертором з достатньою точністю реєструє всі показники роботи інвертора і найголовніші – напругу і струм в режимі рекуперативного гальмування з боку шини 3,3 кВ постійного струму.

Досягти більш точних результатів дозволяє система виміру з використанням персонального комп'ютера (ПК) та цифрових осцилографів, які вмикались до силової системи через вимірювальні трансформатори та датчики напруги та струму. Через ці ж трансформатори та датчики отримує дані система керування інвертором. Вимірювання здійснювали з обох сторін: а) зі сторони 35 кВ змінного струму, де в режимі рекуперативного гальмування ЕРС було зареєстровано інвертований струм та напругу; б) зі сторони 3,3 кВ, де було зареєстровано струм та напругу на шинах підстанції в режимі рекуперативного гальмування ЕРС. Для реєстрації було використано два цифрових осцилографа: Hantek DSO1200 та АКТАКОМ АСК-3106. Процес вмикання та перевірки осцилографів супроводжувався безконтактною вимірювальною системою FLUKE. Дані вимірів цифрових осцилографів через USB інтерфейс передавались на ПК, де синхронно записувались. Ввесь процес був повністю автономний і відокремлений від живлячої мережі підстанції шляхом використання блока безперебійного живлення (БЖ). Як показав експеримент, без блока БЖ реєстрація даних не можлива, оскільки із-за неякісного струму в режимі інвертування сам ПК і цифрові осцилографи не працюють, що супроводжується відмовами і помилками системи і програмного забезпечення.

Крім того, за допомогою вагона-лабораторії ДЕЛ Львівської залізниці було отримано дані моніторингу з рекуперуючого електровоза ВЛ11М.

На ділянці Нижньодніпровсько-Вузол – Верхівцеве Придніпровської залізниці моніторинг рекуперованого струму і напруги на струмоприймачі електровоза ВЛ11М6 здійснювали за допомогою реєстраційної системи діагностування і контролю ДЛІ5.3N локомотива.

Показники якості рекуперованої енергії

Визначимо зазначені показники якості рекуперованої електроенергії при русі з поїздами електроозів ВЛ11М6 на ділянці Нижньодніпровськ-Вузол – Верхівцеве.

Усталене відхилення напруги визначають як відносну різницю між фактичним усталеним U_y та номінальним $U_{ном}$ значенням напруги на струмоприймачі ЕРС за формулою

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

де U_y – усереднене усталене значення напруги на струмоприймачі ЕРС за хвилину, В; $U_{ном} = 1000$ В.

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

В роботі [8] під відхиленням напруги пропонують розуміти зміну напруги такої тривалості, яка призводить до зміни швидкості ЕРС. При цьому слід розуміти відхилення додатнім, якщо $U_y > U_{ном}$; або від'ємним, якщо $U_y < U_{ном}$.

Усереднені значення напруг на струмоприймачі ЕРС та їх відхилення в режимі рекуперативного гальмування наведені в табл. 2, із якої випливає, що максимальне відхилення напруги на струмоприймачі ЕРС у режимі рекуперативної складало 26,1%, а мінімальне – 12,72%. Тобто, у всіх фазах і поїздах величина δU_y значно перевищує навіть гранично допустиме значення.

Таблиця 2

Усталене відхилення напруги при рекуперативній

Номер фази рекуперативної	Номер поїздки			
	№1		№2	
	U_y , В	δU_y , %	U_y , В	δU_y , %
1	3783,4	26,1	3507,4	16,9
2	3622,5	20,75	3644,9	21,5
3	3654,7	21,82	3800,8	26,69
4	3434,7	14,49	3780,4	26,0
5	3381,7	12,72	3617,6	20,59
6	3421,8	14,06	3605,0	20,2
7	3451,4	15,05	3620,6	20,69
8	3613,7	20,46	3660,4	22,0
9	3646,5	21,55	3634,0	21,13
10	3515,2	17,17	3606,0	20,2
11	3573,8	19,13	3553,1	18,44

Під коливаннями напруги розуміють швидку зміну напруг, яка відбувається зі швидкістю 1-2% за секунду і більше. Автори робіт [8,9] 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

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

Результати розрахунків коливань напруги на струмоприймачі ЕРС у режимі рекуперації зведені до табл. 3, із якої випливає, що мінімальне коливання напруги на дослідній ділянці Придніпровської залізниці $\delta U_t = 3,26\%$, а максимальне $\delta U_t = 19,47\%$.

Згідно з європейським стандартом EN50160, допускається коливання напруги до 6...10 %. З табл. 3 випливає, що в режимі рекуперації коливання напруги на струмоприймачі ВЛ11М6 європейським нормам не відповідає.

Таблиця 3

Колівання напруги при рекуперації

Номер фази рекуперації	Номер поїздки					
	№1			№2		
	U_{\max} , В	U_{\min} , В	δU_y , %	U_{\max} , В	U_{\min} , В	δU_y , %
1	3917	3517	13,3	3596	3430	5,53
2	3780	3438	11,4	3738	3447	9,7
3	3734	3514	7,33	3773	3481	9,73
4	3788	3367	14	3686	3102	19,4
5	3442	3277	5,5	3898	3586	10,4
6	3430	3216	7,13	3875	3633	8,07
7	3532	3368	5,46	3705	3541	5,47
8	3633	3535	3,26	3726	3531	6,5
9	3790	3398	13	3646	3464	6,07
10	3554	3388	5,53	3543	3276	8,9
11	3764	3393	12,3	3656	3488	5,6

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:

$$\Delta t_{\text{імп}0,5} = t_{\text{к}0,5} - t_{\text{п}0,5}, \quad (3)$$

де $t_{\text{к}0,5}$, $t_{\text{п}0,5}$ – 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 реєстрограм неможливо. Це пов'язано з

тим, що проміжок часу запису значень напруги на струмоприймачі дорівнює секунді.

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

$$K_{\text{пер}U} = \frac{U_{\max}}{U_{\text{ном}}} \quad (4)$$

Коефіцієнт тимчасової перенапруги характеризується тривалістю $t_{\text{пер}U}$. 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:

$$t_{\text{пер}U} = t_{\text{к.пер}} - t_{\text{п.пер}}$$

Результати розрахунків тимчасової перенапруги на струмоприймачі ЕРС в режимі рекуперації приведені в табл. 4, із якої випливає, що мінімальна перенапруга становить $K_{\text{пер}U} = 1,14$, а максимальна – 1,31.

Приведений вище аналіз показує, що фактичні значення показників якості електроенергії рекуперації електровозів для 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 реєстрограм, записаних на струмоприймачі ЕРС в режимі рекуперації, показує, що на деяких ділянках залізниці застосування рекуперативного гальмування неможливе через значні коливання напруги, які призводять до спрацювання системи захисту як на самому ЕРС, так і на ТП.

Таблиця 4

Коефіцієнт тимчасової перенапруги при рекуперації

Номер фази рекуперації	Номер поїздки			
	№1		№2	
	U_{\max} , В	$K_{\text{пер}U}$, в.о.	U_{\max} , В	$K_{\text{пер}U}$, в.о.
1	3917	1,31	3596	1,2
2	3780	1,26	3738	1,25
3	3734	1,24	3773	1,26
4	3788	1,27	3686	1,23
5	3442	1,15	3898	1,3
6	3430	1,14	3875	1,29
7	3532	1,18	3705	1,24
8	3633	1,21	3726	1,24
9	3790	1,26	3646	1,22
10	3554	1,19	3543	1,18
11	3764	1,15	3656	1,22

Гармонійний склад інвертованих напруги та струму

Раніше була дана оцінка якості рекуперованої електроенергії, що передається від рекуперуючого ЕРС в тягову мережу і далі на тягову підстанцію. Важливою є також задача оцінки якості електроенергії, яка після підстанційного інвертування передається в первинну живлячу трифазну ЛЕП і далі на районну підстанцію (РП). Тому оцінимо гармонійний склад струму і напруги на виході ТП Воловець Львівської залізниці, від якої інвертована електроенергія поступає в трифазну лінію 35 кВ.

На рис. 3-5 приведені осцилограми одного періоду мережевої напруги $u(t)$ і струму $i(t)$ однієї фази «А» для різних інтервалів квантування (відповідно для 20 і 50 кГц) їх експериментального моніторингу.

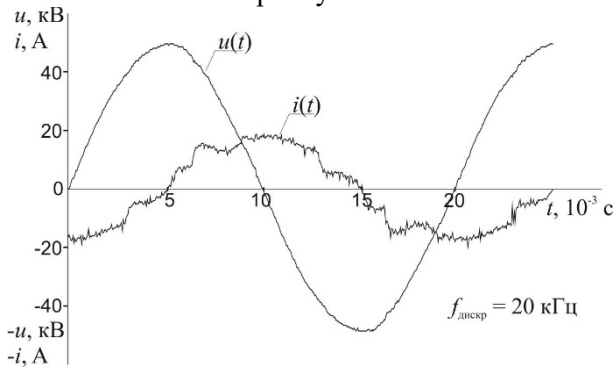


Рис. 3

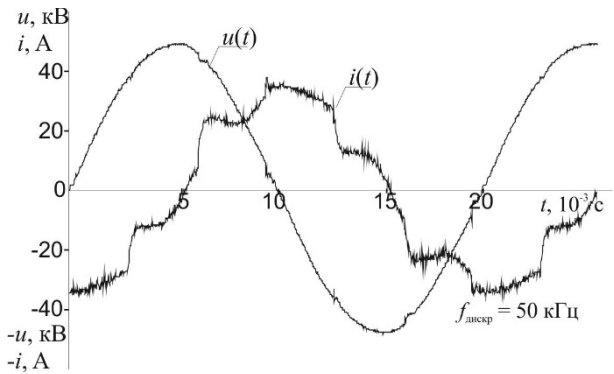


Рис. 4

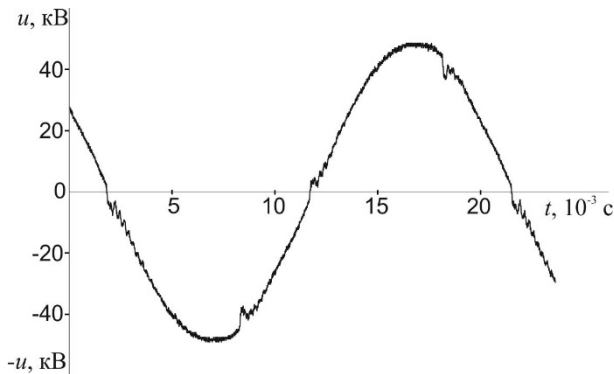
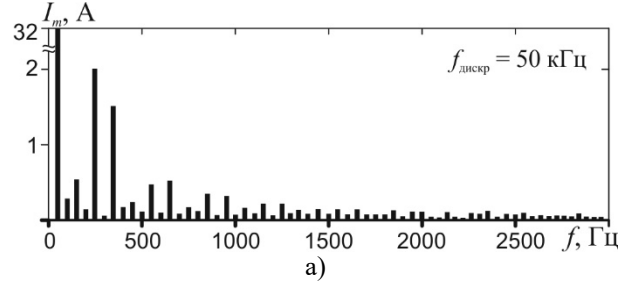


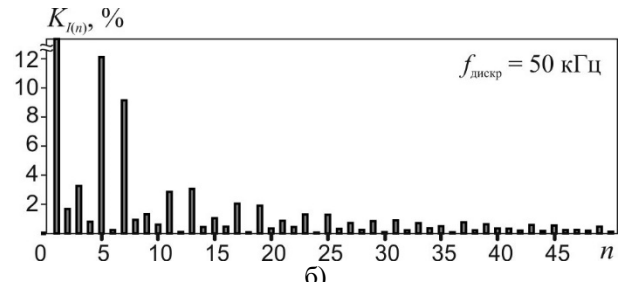
Рис. 5

Як випливає з цих рисунків, напруга є майже синусоїдною, а струм – спотвореним (несинусоїдним) і відстаючим за фазою від напруги на 83...85 електричних градусів. Останнє обумовлено значною індуктивністю ЛЕП 35 кВ, трансформатору та іншого електрообладнання районної підстанції. Спотворення струму обумовлено нелінійностями елементів інверторної установки ТП та електрообладнання РП.

Основний внесок в несинусоїдний характер зміни кривої струму вносять, окрім другої, непарні гармоніки від 3-ї до 25-ї включно. Спектральний склад струму приведено на рис. 6 і 7, а гармоніки, значення $K_{I(n)}$ (згідно з ГОСТ 13109-97) яких склали більше одиниці, подані в табл. 5 і 6.

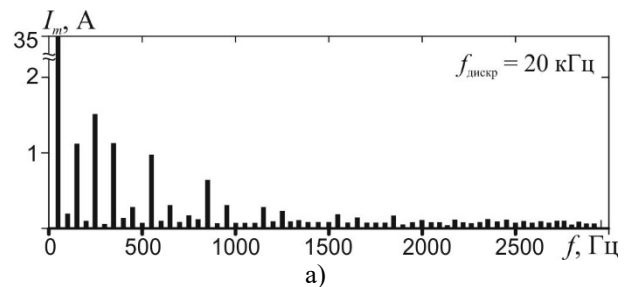


а)

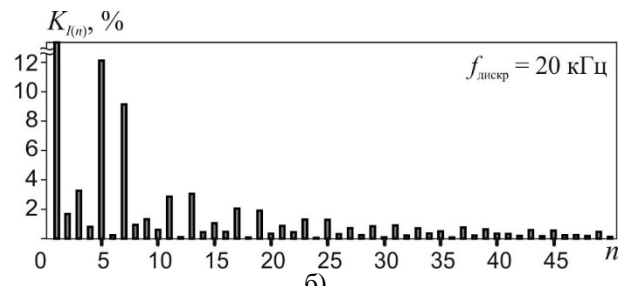


б)

Рис. 6



а)



б)

Рис. 7

Коефіцієнти k -тої гармонійної складової струму $K_{I(n)}$, %												THD_I , %	
k -та гарм.	2	3	5	7	9	11	13	15	17	19	23	25	16,85
$K_{I(n)}$, %	1,68	3,26	12,1	9,1	1,3	2,86	3,05	1,04	2,04	1,9	1,3	1,28	

Таблиця 6

Значення максимально допустимих коефіцієнтів k -тої гармонійної складової струму та інтегрального показника гармонійного складу струму в залежності від параметрів мережі

$I_{кз} / I_{ном}$	Максимально допустимий коефіцієнт k -тої гармонійної складової струму $K_{I(n)}$, %, %					THD_I , %
	$n \leq 11$	$11 \leq n \leq 17$	$17 \leq n \leq 23$	$23 \leq n \leq 35$	$35 < n$	
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20...50	7,0	7,0	2,5	1,0	0,5	8,0
50...100	10,0	10,0	4,0	1,5	0,7	12,0
100...1000	12,0	12,0	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	15,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Як відомо, несинусоїдний струм викликає несинусоїдний спад напруги на внутрішньому опорі мережі. Тому в закордонній електроенергетиці до гармонійного складу струму пред'являють все більші вимоги, які, згідно стандарту IEEE 519-1992, нормуються за інтегральним показником (гармонійного струму), що визначається коефіцієнтом гармонік (THD – Total Harmonic Distortion), за формулою [10, 11]:

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{49} [I^{(n)}]^2}}{I^{(1)}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Допустиме значення I_{THD} залежить від внутрішнього опору ЛЕП, по якій протікає досліджуваний струм. Це значення визначається по співвідношенню струму короткого замикання $I_{кз}$ і номінального струму $I_{ном}$. Всі трансформатори, що використовуються на Україні для живлення системи тяги постійного струму, мають напругу короткого замикання $u_{кз}$ більше 5%. Тоді $I_{кз} / I_{ном}$ буде менший за 20 і при аналізі інвертованого струму до його спектрального складу треба пред'явити найбільш жорсткі вимоги згідно першого рядка табл. 6 [10].

Порівняння максимально допустимих значень коефіцієнта n -ої гармонійної складової струму (табл. 6) з його фактичними значеннями (табл. 5) свідчить про те, що гармоніки 5, 7, 11, 13, 17, 19, 25 перевищують максимально допустимі значення (при $I_{кз} / I_{ном} < 20$).

Інтегральний показник гармонійного складу струму I_{THD} , що визначений за виразом (5), до-

сягає 16,87% (табл. 5) й тим самим перевищує допустиме значення 5% (табл. 6).

Не дивлячись на те, що напруга після інвертування візуально виглядає цілком синусоїдно (рис. 3-5), все ж було визначено її гармонійний склад (рис. 8). Як випливає із цього рисунка, в напрузі мають місце, окрім основної, непарні гармоніки (хоча з незначним вкладом). Їх коефіцієнти n -ої гармонійної складової, які згідно з ГОСТ 13109-97 визначаються за формулою

$$K_{U(n)} = \frac{U^{(n)}}{U^{(1)}} \cdot 100\% \quad (6)$$

і приведені на рис. 8, не перевищують максимально допустимі (згідно ГОСТ 13109-97 для ЛЕП 35 кВ) значення.

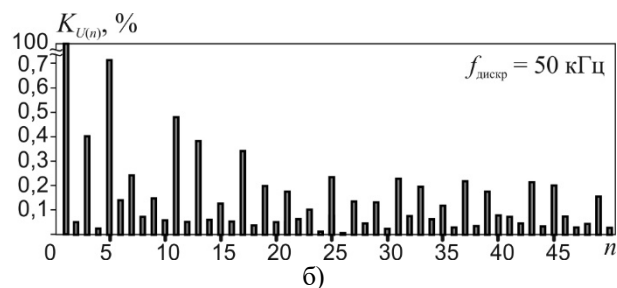
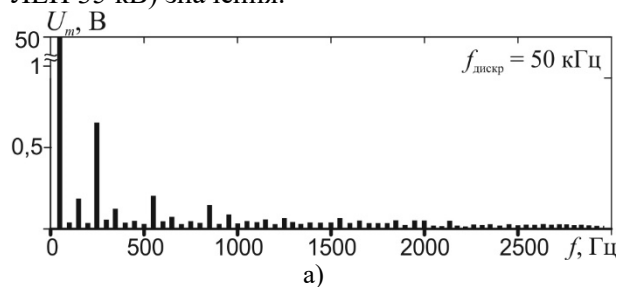


Рис. 8

Висновки

1. Необхідність розробки стандарту, подібного ГОСТ 13109-97, для оцінки показників і норм якості електроенергії в електричних мережах постійного струму являється актуальною задачею сучасної електроенергетики, оскільки зазначений струм, внаслідок технологічних факторів, суттєво, навіть випадковим чином, змінюється в часі, тобто фактично не являється постійним струмом.

2. Фактичні значення показників якості рекуперованої електроенергії виходять за границі допустимих меж. Особливо це стосується таких критеріїв як усталене відхилення і коливання напруги в режимах рекуперативного гальму-

вання, їх значення в 2...3 рази перевищують гранично допустимі величини.

3. В режимах рекуперативного гальмування напруга на виході тягових підстанцій (після інвертування) залишається майже синусоїдною, хоча і містить непарні гармоніки, а струм спотворений також непарними гармоніками від 3-ої до 25-ої і відстає за фазою на 83...85 ел. градусів.

4. Інтегральний показник гармонійного струму (THD_I) після інвертування у 3,6 разів перевищує допустиме значення 5%, що свідчить про низьку якість інвертованої електричної енергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Нікітенко, А. В. Показники якості електричної енергії рекуперованої на електрифікованих ділянках постійного струму [Текст] / Нікітенко А. В. // Науково-технічний збірник «Гірнична електромеханіка та автоматика». – Д.: Видавництво Дніпропетр. нац. гірничого ун-ту, 2014. – Вип. 92 – С. 127-132.

2. Привалов, С. Я. Анализ электрических величин на токоприемнике электровоза в режимах тяги и рекуперации / С. Я. Привалов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего востока. – 2009. – Вып. 1. – С. 308-311.

3. Working Group WG2: Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 4: Voltage unbalance. – UIE, 1998. – 168 p.

4. IEC Standard 61000-4-30. Power quality measurement methods, 2003. – 200 p.

5. IEC Standard 32(1). Machines électriques tournantes. Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement, 1983. – 246 p.

6. EMC Guide for public power supply networks compatibility levels and permissible emission. – VDEW, 1992. – 120 p.

7. Golovanov N. Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power System Supplying High Speed Railway / N. Golovanov, C. Lazaroiu, M. Roscia, D. Zaninelli // PES General Meeting 2005 (June 12-17). – San Francisco, USA, 2005, pp. 120-132.

8. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 582 с.

9. Мамошин, Р. Р. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / Р. Р. Мамошин, А. Н. Зимакова. – М.: Транспорт, 1980. – 296 с.

10. Розанов, Ю. К. Современные методы улучшения качества электроэнергии (аналитический обзор) / Ю. К. Розанов // Электротехника. – 1998. – №3. – С. 10-17.

11. Dugan, Roger C. Electrical Power Systems Quality : second edition / Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty. – McGraw-Hill, 2003. – 528 p.

REFERENCES

1. Nikitenko, A. V. Pokaznyky yakosti elektrychnoji enernihiji rekuperovanoji na elektryfikovanykh diljankakh postijnogho strumu [Energy quality indices of recuperated electric energy in DC electrified sections]. *Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk «Ghirnycha elektromekhanika ta avtomatyka»* [Scientific-technical Bulletin «Mining electrical engineering and automation»], 2014, issue 92, pp. 127-132.

2. Privalov, S. Ya. Analiz elektricheskikh velichin na tokopriemnike elektrovoza v rezhimakh tyagi i rekuperatsii [Analysis of electrical values under current collector of electric locomotive in the traction and recuperative braking modes]. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dalnego vostoka* [Scientific problems in the transport of Siberia and Far East], 2009, issue 1, pp. 308-311.

3. Working Group WG2: Guide to quality of electrical supply for industrial installations. Part 4: Voltage unbalance. – UIE, 1998. – 168 p.

4. IEC Standard 61000-4-30. Power quality measurement methods, 2003. – 200 p.

5. IEC Standard 32(1). Machines électriques tournantes. Caractéristiques assignées et caractéristiques de fonctionnement, 1983. – 246 p.

6. EMC Guide for public power supply networks compatibility levels and permissible emission. – VDEW, 1992. – 120 p.

7. Golovanov, N. Voltage Unbalance Vulnerability Areas in Power System Supplying High Speed Railway / N. Golovanov, C. Lazaroiu, M. Roscia, D. Zaninelli // PES General Meeting 2005 (June 12-17). – San Francisco, USA, 2005, pp. 120-132.

8. Markvardt K. G. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1982, 582 p.

9. Mamoshin R. R. *Elektrosnabzhenie elektrifitsirovannykh zheleznykh dorog* [Power supply of electrified railways]. Moscow, Transport Publ., 1980, 296 p.

10. Rozanov Yu. K. *Sovremennye metody uluchsheniya kachestva elektroenergii (analiticheskij obzor)* [The state-of-the-art methods of energy quality improvement (analytical review)]. *Elektrotehnika* –

Надійшла до друку 01.12.2012.

Electrical engineering, 1998, no. 3, pp. 10-17.

11. Dugan, Roger C. *Electrical Power Systems Quality: second edition* / Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty. – McGraw-Hill, 2003. – 528 p.

Внутрішній рецензент *Сиченко В. Г.*

Зовнішній рецензент *Сасенко Ю. Л.*

Необхідність оцінки якості електроенергії, як споживаної електрорухомим складом (ЕРС) в режимі тяги, так і генерованої при рекуперативному гальмуванні, не дискутується. І якщо ця задача для тягових режимів розв'язана цілком достатньо, то в режимах рекуперації ЕРС постійного струму такі дослідження невідомі. В роботі в якості показників якості рекуперованої електроенергії уведені і використані такі критерії як відхилення і коливання напруги, а також імпульс напруги і тимчасова перенапруга. Виконано і приведено чисельну оцінку цих показників енергії рекуперованої (і далі не інвертованої) електровозами ВЛ11М6 при їх веденні поїздів на діючих ділянках Придніпровської залізниці. Встановлено, що фактичні значення усіх зазначених показників якості виходять за межі гранично допустимих величин. Якість інвертованої електроенергії досліджено для діючої ділянки Воловець-Батьово Львівської залізниці при русі по ній електровозів ВЛ11М; інвертування здійснювалось на тяговій підстанції Воловець. Встановлено, що напруга після інвертування майже синусоїдна (хоча і містить непарні гармоніки), а струм спотворений суттєво, інтегральний його показник THD_i у 3,6 разів перевищує допустиме значення, що складає 5%. За результатами досліджень робиться висновок, що рекуперована електроенергія являється енергією низької якості.

Ключові слова: електроенергія, рекуперація, якість, інвертування, напруга, струм, електровоз, гармоніки.

УДК 621.333.4-021.4

Н. А. КОСТИН, А. Н. МУХА, А. В. НИКИТЕНКО (ДНУЖТ)

Кафедра «Електротехніка і електромеханіка», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна 2, к. 238, г. Днепропетровск, 49010, Украина, тел. +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, andremu@i.ua, nikitenko.diit@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0856-6397, 0000-0002-5629-4058, 0000-0002-6426-5097

КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, РЕКУПЕРИРОВАННОЙ ЭЛЕКТРОВОЗАМИ ВЛ11М6 И ВЛ11М

Необходимость оценки качества электроэнергии, как потребляемой электроподвижным составом (ЭПС) в режиме тяги, так и генерируемой в рекуперативном торможении, не дискутируется. И если эта задача для тяговых режимов решена вполне достаточно, то в режимах рекуперации ЭПС постоянного тока такие исследования неизвестны. В работе в качестве показателей качества рекуперированной электроэнергии введены и используются такие критерии как отклонение и колебание напряжения, а также импульс напряжения и временное перенапряжение. Выполнена и приведена численная оценка этих показателей рекуперированной энергии (и дальше не инвертированной) електровозами ВЛ11М6 при их ведении поездов на действующих участках Приднепровской железной дороги. Установлено, что фактические значения всех указанных показателей качества выходят за пределы гранично допустимых величин. Качество инвертированной электроэнергии исследовано для действующего участка Воловец-Батево Львовской железной дороги при движении по ней электровозов ВЛ11М; инвертирование осуществлялось на тяговой подстанции Воловец. Установлено, что напряжение после инвертирования почти синусоидальное (хотя и содержит нечетные гармоника), а ток искаженный существенно, интегральный его показатель THD_i в 3,6 раз превышает допустимое значение, что составляет 5%. По результатам исследований делается вывод, что рекуперированная электроэнергия является энергией низкого качества.

Ключевые слова: электроэнергия, рекуперація, качество, инвертирование, напряжение, ток, электровоз, гармоника.

Внутренний рецензент *Сиченко В. Г.*

Внешний рецензент *Сасенко Ю. Л.*

UDC 621.333.4-021.4

M. O. KOSTIN, A. M. MUKHA, A. V. NIKITENKO (DNURT)

Department of Electrical Engineering and Electromechanics, Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazarian, Lazarian Str., 2, office 238, Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel. +380563731537, e-mail: nkostin@ukr.net, andremu@i.ua, nikitenko.diit@gmail.com; ORCID: 0000-0002-0856-6397, 0000-0002-5629-4058, 0000-0002-6426-5097

THE QUALITY OF ELECTRIC ENERGY RECUPERATED BY LOCOMOTIVES VL11M6 AND VL11M

The necessity of electric energy quality evaluation, consumed by electric rolling stock (ERS) in traction mode and generated in recuperative braking mode, is not discussed. If this task for the traction mode is solved sufficiently, then for the recuperative braking mode of DC ERS such investigations are unknown. In the paper the quality indices of recuperated electric energy are represented by the voltage deviation, the voltage oscillation, and also the voltage impulse and temporary overvoltage. The numerical evaluation of these indices is done and shown for recuperated (and further inverted) energy, which was generated by electric locomotives VL11M6 in the sections of Prydniprovsk railway. It is determined that the real values of all mentioned indices of quality are step outside the limits of admissible quantity. The quality of inverted electric energy is investigated for the section Volovets – Batiovo of Lviv railway at the moment of electric locomotive VL11M operation. Inverting was done on railway substation Volovets. It is established that the voltage after inverting almost sinusoidal (although has non-paired harmonics) and current which is unclear considerably, integral indicator THD_I in 3,6 times increases the accepted value, that is 5 %. As to the research results, the conclusion is the recuperated electric energy is the energy of low quality.

Keywords: electric energy, recuperation, quality, inverting, voltage, current, electric locomotive, harmonics.

Internal reviewer *Sychenko V. G.*

External reviewer *Saenko Yu. L.*