

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

УДК 621.311.

В.Г. Сиченко, д-р техн.наук, Д.О. Босий, канд. техн.наук,

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

В.В. Кузнецов, канд. техн.наук,

(Україна, м. Дніпропетровськ, Національна металургійна академія України)

ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ ЕЛЕКТРИФІКОВАНИХ ЗАЛІЗНИЦЬ

Анотація. Встановлено різний характер режимів споживання та генерації реактивної потужності у лініях 27,5, 10 та 0,4 кВ. Виявлено широкий розкид статистичних характеристик показників якості електроенергії та значні спотворення кривих струму, що дозволить більш точно формувати методологію заходів з поліпшення якості електричної енергії у мережах нетягових споживачів.

Ключові слова: якість електричної енергії, лінії живлення нетягових споживачів, реактивна потужність, спотворення струму, статистичні характеристики.

Аннотация. Установлен разный характер режимов потребления и генерации реактивной мощности в линиях 27,5, 10 и 0,4 кВ. Выявлен широкий разброс статистических характеристик показателей качества электроэнергии и значительные искажения кривых тока, что позволит более точно формировать методологию мероприятий по улучшению качества электрической энергии в сетях нетяговых потребителей.

Ключевые слова: качество электрической энергии, линии питания нетяговых потребителей, реактивная мощность, искажение тока, статистические характеристики.

Abstract. It was found the different character modes of consumption and generation of reactive power in the lines 27.5, 10 and 0.4 kV. The wide variation in the statistical characteristics of power quality indicators and significant distortion curves current form will allow more accurate methodology measures to improve the quality of electricity networks of non-traction consumers.

Keywords: power quality, power lines of non-traction consumers, reactive power, current distortion, statistical characteristics.

Вступ

Сформовані нині системи тягового електропостачання передбачають електропостачання нетягових залізничних споживачів великих залізничних станцій і вузлів (об'єкти інфраструктури, у тому числі локомотивного і вагонного господарства, культурно-побутові об'єкти, сторонні споживачі та ін.) безпосередньо від підстанцій енергосистем або від тягових підстанцій. Живлення нетягових залізничних споживачів, розташованих на залізничних перегонах і залізничних станціях, що знаходяться на міжпідстанційних зонах (освітлення проміжних станцій, зупинних пунктів, лінійно-колійних будівель, пристроїв автоблокування та ін.), здійснюється, як правило, від ліній поздовжнього електропостачання 6, 10, 35 кВ або від районних електромереж. Основне живлення пристроїв СЦБ і зв'язку здійснюється від ліній електропередачі автоблокування напругою 6, 10 кВ, резервне живлення – від лінії електропередачі “два проводирейки” (ДПР) з номінальною напругою 25 кВ або від лінії електропередачі поздовжнього електропостачання (ПЕ) напругою 6 і 10 кВ. Для живлення сигнальних установок застосовуються однофазні комплектні трансформаторні підстанції (КТП), які монтують на опорах [1].

Від ліній ПЕ та ДПР також отримують живлення сторонні споживачі, промислові підприємства та населення. Відпуск електроенергії цим споживачам за останні п'ять років зріс на 15 % і складає на 01.01.2015 р. майже 8 млн кВт·год [2]. Відбуваються структурні зміни і в характері споживчого навантаження, а саме: збільшення частки побутового устаткування (персональні комп'ютери, сервери, принтери, блоки безперебійного живлення, мікрохвильові печі і тому подібне), яке використовує однофазні джерела живлення, а також регульовані електроприводи систем кондиціонування і вентиляції. Освітлення виконується за допомогою люмінесцентних ламп з електронним баластом. У цієї групи споживачів частка

нелінійного навантаження може значно перевищувати лінійну складову. Як правило, джерела живлення офісного устаткування використовують мостові випрямлячі з ємнісними згладжуючими фільтрами. У випрямлячах, використовуваних в сучасних джерелах електроживлення, напруга мережі подається безпосередньо на діодний міст. Випрямлений струм перетворюється за допомогою комутатора в змінний струм високої частоти, а потім знову випрямляється. Такі джерела живлення викликають значні спотворення форми споживаного струму, істотну частку якого складають компоненти з частотою третьої гармоніки [3].

Знижена якість електроенергії є не лише технологічною проблемою сучасних систем електропостачання, але і причиною істотних економічних втрат для усіх учасників ринку електроенергії. Тому однією з найбільш актуальних проблем побудови сучасного електропостачання таких споживачів є забезпечення якості електроенергії. Разом з відомими причинами погіршення якості електроенергії з'явилася ще одна - широке поширення нелінійних навантажень, що створюють при своїй роботі струми несинусоїдальної форми. Вищі гармоніки чинять несприятливий вплив на роботу силового електроустаткування, пристроїв релейного захисту й автоматики, викликають прискорене старіння ізоляції [4].

Підвищення ефективності використання електроенергії стаціонарними залізничними та сторонніми споживачами є важливою складовою проблеми енергозбереження на залізничному транспорті. Нині існує безліч заходів, спрямованих на зниження втрат і підвищення енергоефективності електроустаткування, які можна об'єднати в три взаємопов'язані напрями: раціональне керування режимами роботи устаткування, керування якістю електроенергії (ЯЕ), підвищення зацікавленості і мотивації технологічного персоналу. Засоби підвищення ЯЕ доцільно вибирати за умовами допустимості режимів і їх оптимізації для виконання нормативних вимог до якості електроенергії. Вибір способів і технічних засобів підвищення ЯЕ з безлічі існуючих - завдання великої складності. Оптимальний вибір за техніко-економічними критеріями з урахуванням безперервного взаємного впливу електричних навантажень дозволить зменшити витрати на спеціальне устаткування і пристрої [5]. Необхідно зазначити, що вирішення зазначених проблем має базуватися на результатах інструментального дослідження якості електричної енергії в процесі її передачі та споживання.

Метою роботи є дослідження та аналіз показників якості електроенергії у лініях живлення нетягових промислових споживачів.

Методика проведення вимірювань

Експериментальні дослідження є основним джерелом інформації для вивчення електромагнітних процесів перетворення і споживання електричної енергії, електромагнітних процесів і завод, а також конкретних електричних пристроїв у системі тягового електропостачання електрифікованих залізниць (СТЕ) [4]. Енергообмінні процеси в системі тягового електропостачання мають імовірнісний характер, а їх параметри є статистичними характеристиками. Тому дослідження ЯЕ базуються на застосуванні статистичних методів обробки та аналізу експериментальних даних, отриманих як в результаті фізичного експерименту, так і в результаті математичного моделювання.

Сучасні засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) дозволяють реалізовувати вимірювальні алгоритми високого рівня складності з відповідним збільшенням їх можливостей та високою точністю вимірювань, при цьому частина вимірювальної процедури базується на реалізації її програмними засобами. Для контролю та фіксації якості електромагнітних процесів у колах змінного струму основними ЗВТ, які застосовувались при дослідженні, є портативні аналізатори типу EDL-175xg чи PNA-296 виробництва фірми SATEC побудовані на базі приладу для вимірювання показників якості та обліку електричної енергії PM175.

Як приклад на рис. 1 приведено схему вимірювання показників якості електроенергії на діючій електрифікованій ділянці змінного струму в лінії ДПР.

В процесі експериментальних досліджень оцінювались такі показники якості електричної енергії:

- рівень та відхилення напруги;
- коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю;
- коефіцієнт спотворення синусоїдності напруги.

Додатково виконувалась оцінка коефіцієнта реактивної потужності та коефіцієнта спотворення струму.

Результати досліджень та їх аналіз

Вибіркові результати досліджень якості електроенергії в лініях живлення нетягових споживачів ДПР, ПЕ 10 кВ та 0,4 кВ наведені на рис. 2-4, а статистичні характеристики наведені у таблицях 1-3.

Аналіз отриманих показників якості електроенергії в лінії ДПР виявив, що в цілому статистичні характеристики усталеного відхилення напруги в мережі 27,5 кВ знаходяться в межах допустимих значень та за час спостереження змінювались незначно. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю на шинах 27,5 кВ тягових підстанцій змінювався в межах 0...3,63 %, що перевищує нормально допустиме значення, але знаходиться в межах гранично допустимих значень. Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги на шинах 27,5 кВ тягових підстанцій змінювався в межах 0...10,5 %, що перевищує і нормально допустиме значення, і гранично допустиме значення.

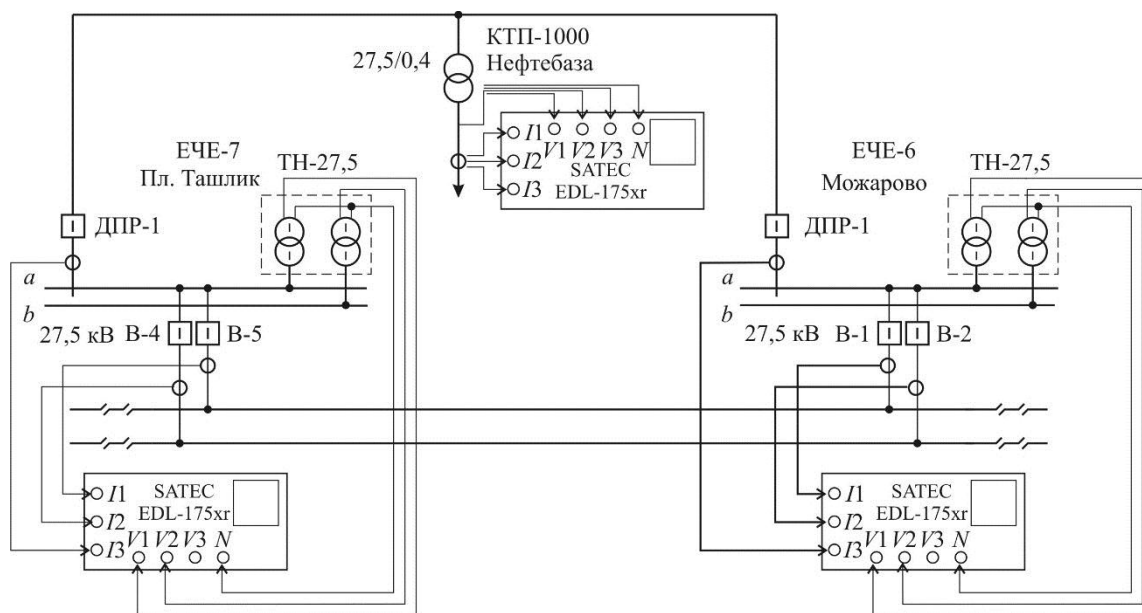


Рис. 1. Схема проведення вимірювань на промисловому об'єкті, що живиться від ДПР.

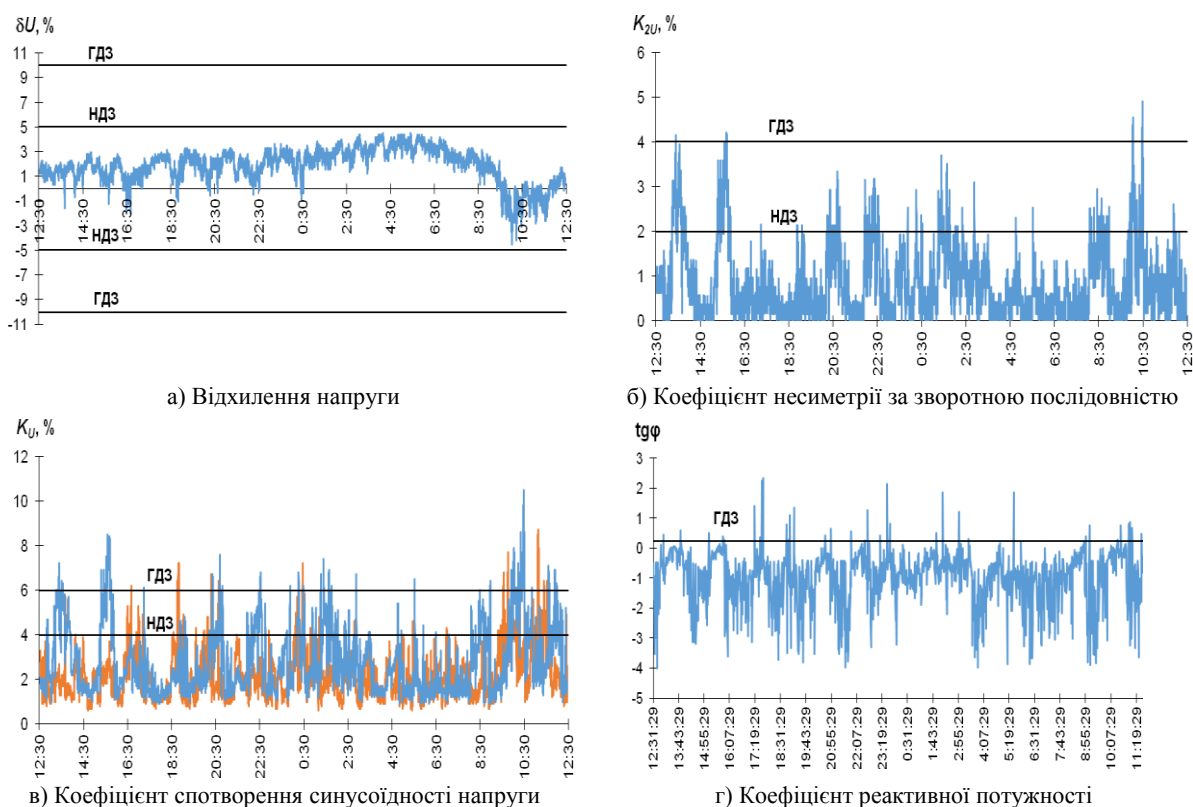


Рис. 2. Якість електроенергії в лінії ДПР.

Аналіз отриманих показників якості електроенергії в лінії 10 кВ виявив, що статистичні характеристики усталеного відхилення напруги знаходяться в нормованих межах та за час спостереження змінювались незначно. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю в лінії 10 кВ змінювався в межах 0...1,58 %, що не перевищує нормально допустимого значення. Проте, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги в лінії 10 кВ тягових підстанцій змінювався в межах 0...14,4 %, що перевищує і нормально допустиме значення, і гранично допустиме значення.

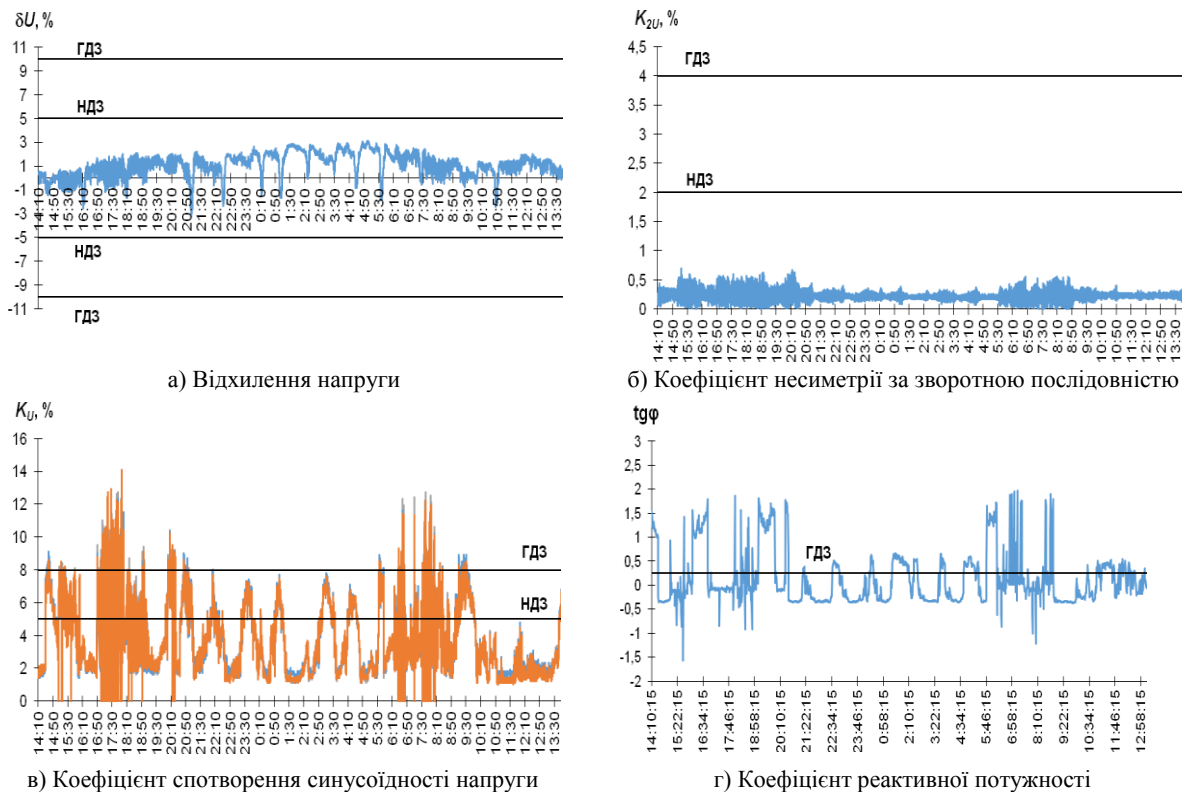


Рис. 3. Якість електроенергії в лінії 10 кВ.

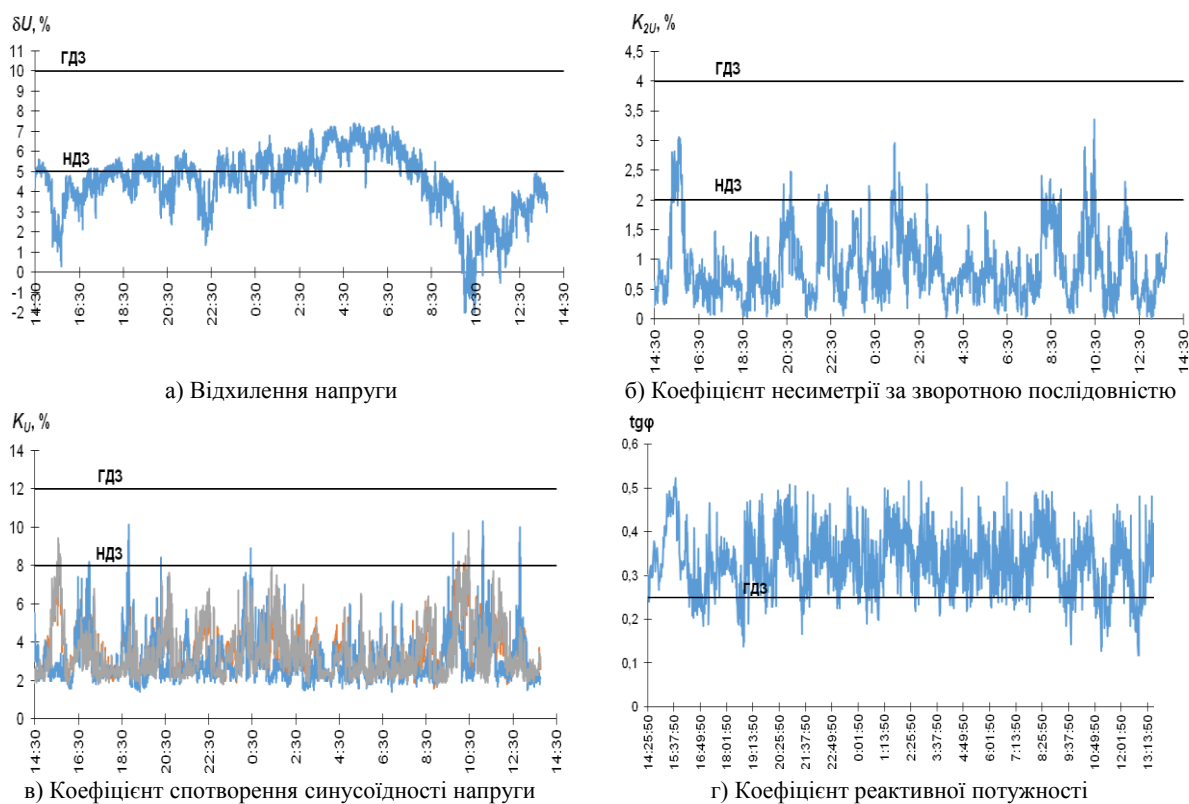


Рис. 4. Якість електроенергії на шинах 0,4 кВ.

Електропостачання та електроустаткування

Таблиця 1.

Статистичні характеристики якості електроенергії у лінії ДПР 27,5 кВ

Показник	U			δU	$K_{2U}, \%$	$K_U, \%$			tgφ	$K_i, \%$
	U _A	U _B	U _C			U _A	U _B	U _C		
M	27844,55	28179,63	28016,05	1,86	0,83	2,76	2,14	0,00	-0,97	
Mo	28034,00	28401,00	28122,00	2,61	0,03	1,40	1,20	0,00	0,00	
Me	27938,00	28305,00	28074,00	2,09	0,56	2,30	1,90	0,00	-0,78	
D	208507,75	166606,06	139821,91	1,87	0,58897	2,14	1,18	0,00	0,80	
s	456,63	408,17	373,93	1,37	0,7674	1,46	1,09	0,00	0,89	
As	-0,93	-0,94	-0,89	-0,89	1,41	1,25	1,60	0,00	-0,88	
Ex	1,67	0,87	0,93	0,96	1,93	1,37	3,74	0,00	1,36	
min	25259,00	26393,00	26313,00	-4,50	0,03	0,90	0,60	0,00	-3,99	6,4
max	28799,00	28974,00	28743,00	4,52	4,90	10,50	8,70	0,00	2,35	41,7

Таблиця 2.

Статистичні характеристики якості електроенергії у лінії 10 кВ

Показник	U			δU	$K_{2U}, \%$	$K_U, \%$			tgφ	$K_i, \%$
	U _A	U _B	U _C			U _A	U _B	U _C		
M	10065,14	10052,39	10108,79	0,75	0,36	3,81	3,92	3,70	2,74	
Mo	10077,14	10065,85	10120,38	2,38	0,35	1,80	1,70	1,30	2,05	
Me	10075,34	10062,37	10120,38	0,86	0,37	3,20	3,20	3,00	2,07	
D	9369,75	9323,13	9535,52	0,93	0,01409	5,36	5,37	5,13	2,74	
s	96,80	96,56	97,65	0,96	0,1187	2,32	2,32	2,26	1,65	
As	-0,68	-0,67	-0,62	-0,65	0,12	0,78	0,78	0,74	1,71	
Ex	0,75	0,57	0,35	0,58	2,65	0,04	-0,12	-0,07	1,77	
min	9641,48	9643,22	9678,70	-3,46	0,01	0,00	0,00	0,00	1,10	7,3
max	10260,73	10300,55	10305,71	2,71	1,58	13,60	14,40	13,80	9,13	18,5

Таблиця 3.

Статистичні характеристики якості електроенергії у лінії 0,4 кВ

Показник	U			δU	$K_{2U}, \%$	$K_U, \%$			tgφ	$K_i, \%$
	U _A	U _B	U _C			U _A	U _B	U _C		
M	400,06	395,65	395,36	4,48	0,88	3,07	3,69	3,44	0,33	
Mo	400,97	399,68	398,20	5,37	0,59	2,30	2,50	2,30	0,33	
Me	401,14	396,73	396,57	4,74	0,73	2,70	3,50	3,00	0,33	
D	32,96	46,55	38,99	2,50	0,29136	1,39	1,47	1,68	0,01	
s	5,74	6,82	6,24	1,58	0,5398	1,18	1,21	1,30	0,07	
As	-0,88	-1,06	-1,04	-0,96	1,15	1,94	0,98	1,35	0,10	
Ex	0,38	1,87	1,50	1,29	1,23	5,34	0,79	1,68	-0,27	
min	378,56	362,48	366,41	-2,66	0,00	1,40	1,60	1,70	0,12	9,8
max	410,58	408,08	407,90	7,42	3,36	10,30	8,50	9,80	0,52	38,3

У свою чергу, на приєднаннях 0,4 кВ величина коефіцієнта K_U знаходиться в межах 1,4...10,3 %, що перевищує нормально допустиме, але в межах гранично допустимого значення. При цьому усталене відхилення напруги змінювалось від - 2,66 % до + 7,42 %, що перевищує нормально допустимі значення. Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю на приєднаннях 0,4 кВ змінювався в межах 0...3,43, тобто, в деякі моменти часу перевищував нормально допустимі значення.

Цікавим є спостереження за змінами коефіцієнта реактивної потужності в досліджуваних лініях. Так, у лінії ДПР майже протягом всього часу має місце генерація реактивної потужності. Можна зробити висновок, що вона викликана ємнісною провідністю лінії при незначному рівні навантаження. В лінії 10 кВ режими генерації та споживання реактивної потужності чергуються та викликані циклічністю технологічного процесу нетягового споживача. На приєднаннях 0,4 кВ майже протягом усього часу спостереження має місце споживання реактивної потужності. Значення величини tgφ на всіх досліджуваних рівнях напруги перевищує нормований рівень в 0,25.

Особливої уваги заслуговує дослідження коефіцієнта спотворення струму. Діючі на території України нормативні документи, що регулюють питання забезпечення якості електроенергії, побудовані на необхідності дотримання показників якості електроенергії, похідних від напруги [4]. В європейській практиці використовується стандарт IEC 519-1992 [6], який визначає максимальні значення струмів непарних гармонік у відсотках від струму навантаження. Відповідно до цього стандарту максимальне значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму залежить від відношення струму короткого замикання мережі в точці загального приєднання до струму навантаження. У разі потужної мережі (прийmemo до уваги той факт, що потужність тягової підстанції значно перевищує потужність нетягового на-

вантаження) максимальне значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої струму не має перевищувати 15 %. Струми гармонік порядковими номерами $n < 11$ мають бути менше 12 % від струму навантаження. Як показують результати розрахунків (табл. 1-3) коефіцієнти спотворення струму в досліджуваних лініях значно перевищують наведені нормативи. При цьому розмахи змін спотворення струму мають більші значення в лінії ДПР та отримуючого живлення від неї споживача 0,4 кВ.

На рис. 5-7 наведено емпіричні закони розподілу досліджуваних показників якості на різних приєднаннях. Їх аналіз вказує на значний розкид значень досліджуваних показників якості, викликаний нестаціонарними енергообмінними процесами, які відбуваються у тягових мережах змінного та постійного струму.

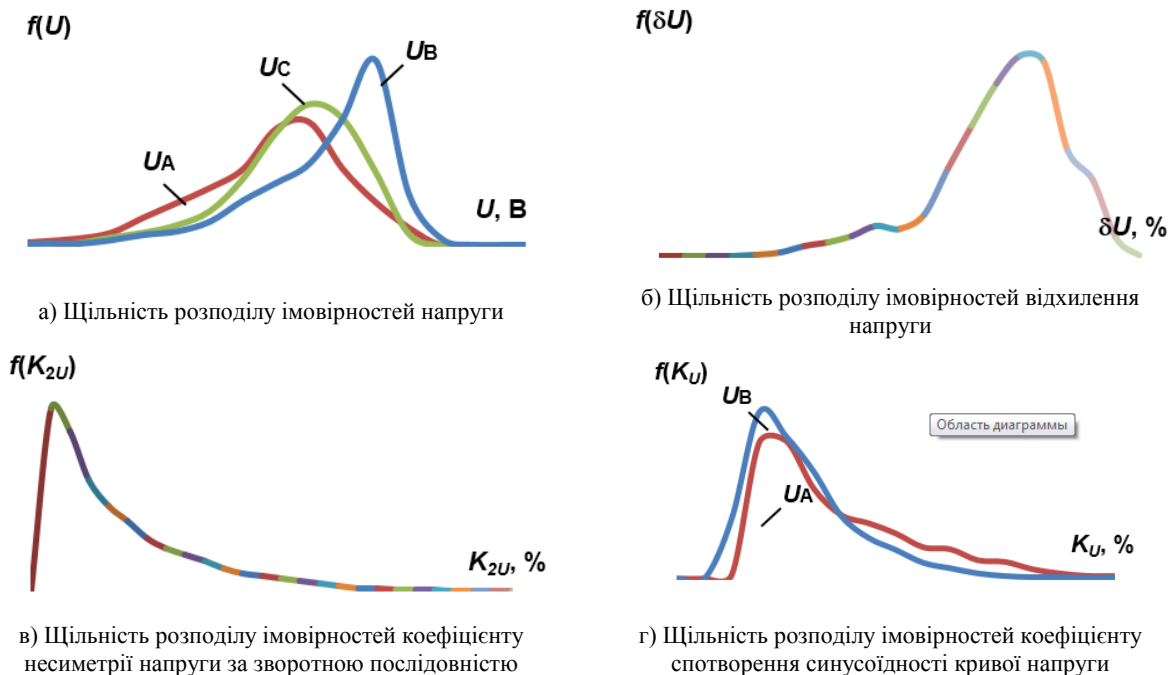


Рис. 5. Емпіричні закони розподілу показників якості електроенергії на шинах 27 кВ.

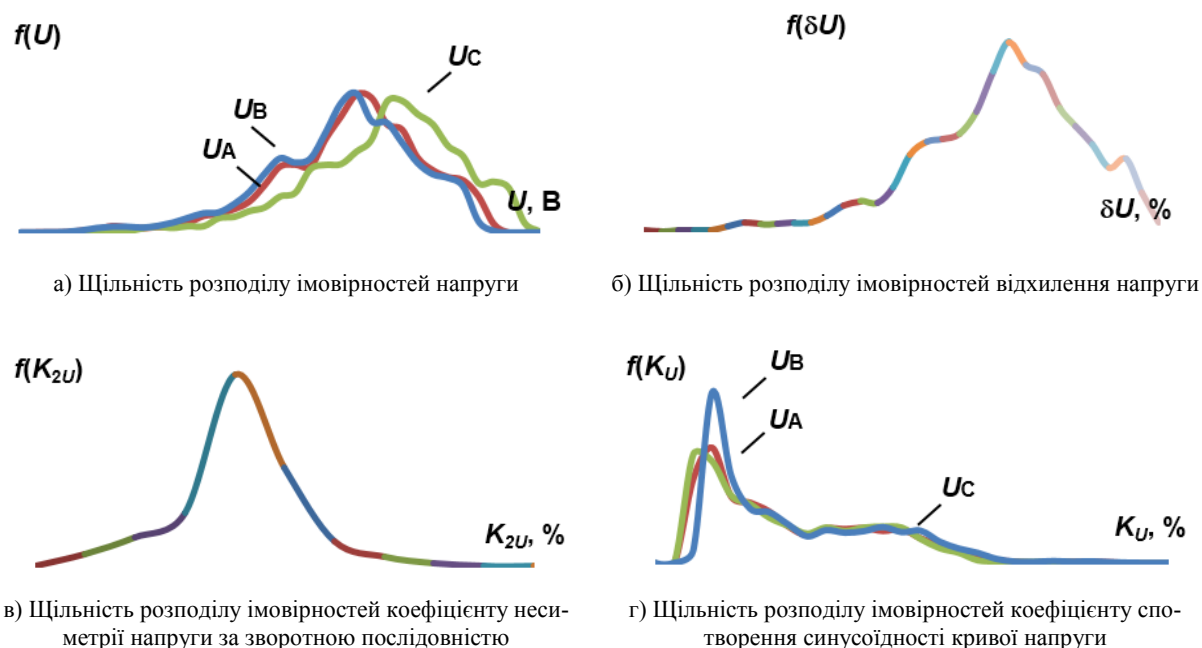


Рис. 6. Емпіричні закони розподілу показників якості електроенергії на шинах 10 кВ.

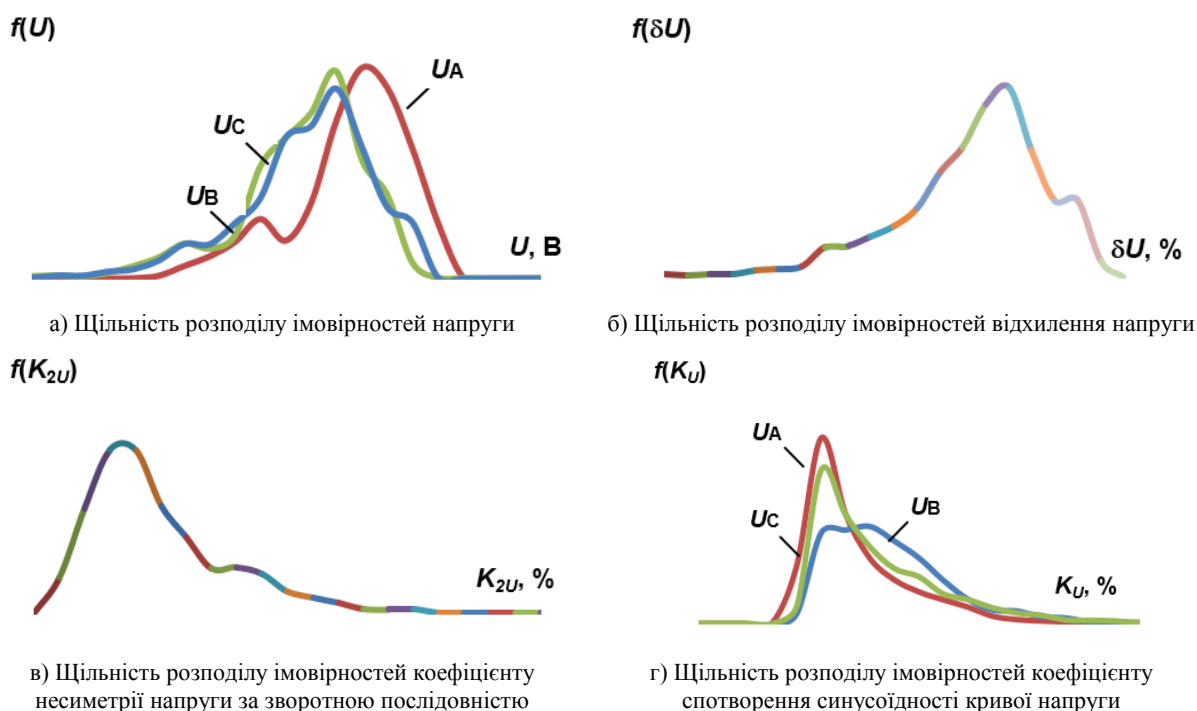


Рис. 7. Емпіричні закони розподілу показників якості електроенергії на шинах 0,4 кВ

При розробці напрямків з підвищення якості електричної енергії в лініях нетягового електропостачання необхідно передбачати заходи, спрямовані не тільки на підтримку якості електроенергії, але й надійності електропостачання, підвищення енергоефективності та зменшення втрат в системах електропостачання.

Список літератури

1. Ратнер, М.П. Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог. / М.П. Ратнер, Е.Л. Могилевский. – М.: Транспорт, 1985. – 295 с.
2. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2014 році. – К. Укрзалізниця, 2015. – 240 с.
3. Темербаев, С. А. Анализ качества электроэнергии в городских распределительных сетях 0,4 кВ. / С.А. Темербаев, Н.П. Боярская, В.П. Довгун, В.О. Колмаков.// Электронный ресурс, режим доступа: http://elib.sfu-kras.ru/bitstream/2311/9644/1/12_Temerbaev.pdf.
4. Сиченко, В. Г. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць / В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саченко, Д.О. Босий. – Д.: ПФ Стандарт-Сервіс, 2015. – 344 с.
5. Третьяков, Е. А. Оптимизация качества и потерь электрической энергии в электрических сетях нетяговых потребителей.// Транспорт Российской Федерации, 2011, № 3, с. 50-54.
6. IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 1993.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Муха А.М.

УДК 621.331

Д.О. Босий, канд. техн. наук

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

ВЗАЄМОДІЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО З СИСТЕМАМИ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Анотація. Наведено результати досліджень на узагальнених моделях взаємодії систем електричної тяги постійного і змінного струму із системою зовнішнього електропостачання. В якості методів дослідження використано двовимірний розподіл величини тягового навантаження в припущенні, що ор-