

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У СПОЖИВАЧІВ, ЩО ЖИВЛЯТЬСЯ ВІД ЛІНІЇ ДПР 27,5 КВ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ

<sup>1</sup>Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

*Подано результати експериментального дослідження якості електричної енергії у споживача, що отримує живлення від лінії ДПР залізниць змінного струму. Розглянуто основні фактори, що впливають на якість електричної енергії у цих лініях. Проведено аналіз та статистично оцінено виміряні дані.*

**Ключові слова:** лінія два проводи—рейка, електромагнітна сумісність, якість електроенергії, нетягові споживачі.

### Вступ

Лінія ДПР — це змонтована на опорах контактної мережі електрифікованих залізниць змінного струму трифазна лінія напругою 27,5 кВ, призначена для електропостачання нетягового навантаження: об'єктів залізничної інфраструктури, сторонніх (незалізничних) електроприймачів та побутових споживачів, що розташовані неподалік залізниці. Контактна мережа та лінія ДПР отримують живлення від одного розподільчого пристрою тягової підстанції напругою 27,5 кВ, що електрично пов'язує її з тяговою мережею та дає можливість використовувати рейкову колію у якості третього фазного проводу (рис. 1). Ця конструктивна особливість лінії була відображення у її назві «два проводи—рейка» або ДПР.

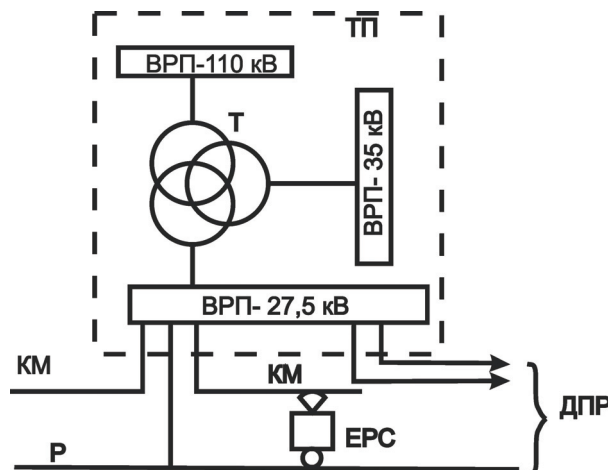


Рис. 1. Схема тягової підстанції змінного струму: ТП — тягова підстанція; ВРП — відкритий розподільчий пристрій; Т — головний знижувальний трансформатор; КМ — контактна мережа; Р — рейка; ЕРС — електрорухомий склад; ДПР — лінія «два проводи—рейка»

У зв'язку з простотою конструкції та низькою зацікавленістю у належній якості електричної енергії у минулому лінії електропостачання, виконані за системою ДПР, отримали широке розповсюдження на залізницях України з системою тяги змінного струму. Втім, експлуатація цих ліній супроводжується порушенням якості електричної енергії, викликаними як конструкцією самої лінії так і умовами її роботи [1]. Основними причинами виникнення проблеми електромагнітної сумісності між споживачем та лінією ДПР є гальванічний зв'язок останньої з системою тягового електропостачання, неоднорідність самої лінії та магнітний вплив тягової мережі. Так, контактна мережа є несиметричною однофазною лінією та джерелом електромагнітних полів. Індуковані у проводах додаткові поздовжні електрорушійні сили, які можуть досягати значних величин за більших навантажень, особливо наприкінці довжини зближення, викликають додаткові втрати електроенергії та падіння напруги. Разом з тим, якщо не брати до уваги падіння напруги від протікання тягового струму під впливом магнітного поля контактної мережі, потенціал рейки відносно землі практично не змінюється. При цьому, трикутник лінійних напруг на прийомному кінці лінії спотворюється, а його центр ваги виявляється зміщеним відносно центра ваги трикутника лінійних напруг на шинах підстанції. Останнє, у поєднанні з неоднорідністю самої лінії, призводить до різкої несиметрії системи лінійних напруг у лінії ДПР. Варто зазначити, що під час

проїзду електровозу потенціал у місці приєднання КТП ДПР до рейки збільшується, найбільше його можливе значення буде у випадку роботи електрорухомого складу у режимі пуску. За пускових струмів величина потенціалу рейок перевищує значення, що відповідають 1...2% номінальної напруги лінії ДПР. Тяговий струм, унаслідок роботи перетворювачів електрорухомого складу та специфіки параметрів системи тягового електропостачання, має несинусоїдну форму, що зумовлює появу вищих гармонік у наведеній напрузі з частотами, кратними 50 Гц. Накладаючись на основну частоту, вищі гармоніки спотворюють синусоїду напруг і у місцях приєднання знижувальних трансформаторів несинусоїдність напруги та струму може перевищувати встановленні у стандарті межі. До вищевикладеного слід додати, що якість напруги на шинах підстанції, від яких отримує живлення тягова мережа та відходять фідери лінії ДПР, може бути значно погіршена через нерівномірне завантаження тягового трансформатора та вплив системи зовнішнього електропостачання [2], [3]. Таким чином, на процес передачі електричної енергії лінією ДПР впливає низка шкідливих факторів, інтегральний вплив яких може призвести до перевищення визначених у стандарті допустимих значень показників якості електричної енергії, що оцінюють несиметрію, відхиленням та несинусоїдністю напруги.

Незадовільна якість напруги живлення призводить до погіршення умов роботи приймачів електроенергії, збільшує можливість відмови їх роботи, зменшує термін експлуатації, викликає додаткові втрати потужності під час її передачі та перетворення. Наприклад, відхилення напруги призводить до зменшення обертового моменту, зростання втрат потужності асинхронних двигунів та зменшення коефіцієнта потужності керованих вентильних перетворювачів [4]. Несиметрична напруга викликає струми зворотної послідовності, що гальмують обертання ротора двигунів. Приведення до потрібного значення обертового моменту пришвидшує старіння ізоляції, тому робота у мережі з несиметричною напругою потребує використання двигунів з більшою потужністю ніж вимагають виробничі потреби. Вищі гармоніки мають вплив на ізоляцію та ємнісні елементи, прискорюючи у них іонізаційні процеси, що, у наслідок, призводить до старіння діелектрика та до відмови роботи електроприймачів. Це неповний список проблем, причиною яких є погіршення якості електричної енергії. Важливість питання електромагнітної сумісності на сучасному етапі розвитку економіки та відповідність світовим тенденціям до збереження енергетичних ресурсів постійно зростає. Тому, *метою статті* є дослідження роботи ліній ДПР у сучасних умовах з визначенням показників якості електричної енергії, яку отримує споживач від лінії ДПР, з подальшою їх статистичною оцінкою та порівнянням зі встановленими у державному стандарті нормами [5].

Внесок у дослідження енергетичних процесів у лінії ДПР зробили А. І. Тамазов [6], М. П. Ратнер [7], О. М. Журавльов [8], Т. Е. Фіноченко [9], В. П. Закарюкін, А. В. Крюков [10]. Зокрема О. М. Журавльов і Т. Е. Фіноченко зі співавторами запатентували технічні рішення для вдосконалення лінії ДПР [11], [12]. Проте їхні розробки лише частково вирішують проблему електромагнітної сумісності, залишаючи без уваги те, що, у більшості випадків, електропостачання лініями ДПР виконається за консольною схемою. Це пояснюється особливістю підключення фаз трансформатора тягових підстанцій до живлячої мережі, яке виконано з метою компенсації впливу однофазного тягового навантаження на неї та, як наслідок, зумовлює різну конфігурацію векторів вихідної напруги суміжних підстанцій.

## Основна частина

### Проведення експерименту

Дослідження показників якості проводилось у споживача, який живиться від лінії ДПР та поскаржився на невідповідну якість електроенергії.

Приєднання засобів вимірювальної техніки показано на рис. 2. Для вимірювання та реєстрації використано портативний аналізатор якості електричної енергії SATEC EDL-175xr (рис. 3), який підключено до кола напруги та струму за допомогою гнучких роз'ємних кліщів типу LEM-Flex. Аналізатор підключався до мережі 380 В на ввіді КТП-1000. Обробка та аналіз даних виконувався за допомогою програми PAS (Power Analysis Software), розробленої для SATEC. Вимірювання проводилось без втручання у робочу схему живлення споживачів ДПР, тобто для нормальної схеми електропостачання.

Аналіз якості електроенергії проводився за такими показниками: усталене відхилення напруги  $\delta U_y$ , коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності  $K_{2U}$  та коефіцієнт спотворення

синусоїдальності кривої напруги  $K_U$ . Відповідно до вимог ГОСТ 13109-97 п. 6.1, тривалість вимірювання становило 24 години. Інтервал реєстрації миттєвих значень електричних величин 1 с.

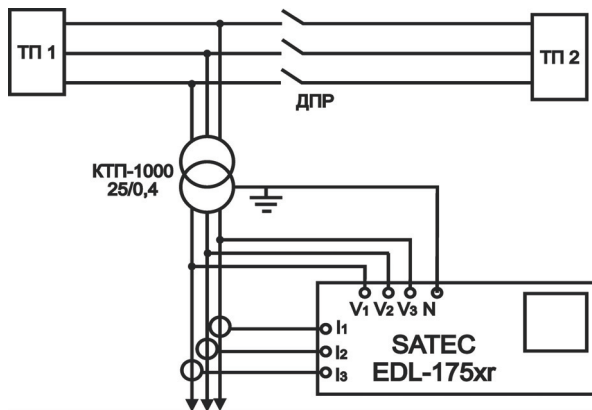


Рис. 2. Схема підключення приладу до вторинного кола трансформатора КТП



Рис. 3. Портативний аналізатор якості електричної енергії SATEC EDL-175xr

Аналізатор фіксує миттєві значення напруги та струму, фази та частоту електричних величин та автоматично розраховує показники якості електричної енергії. На їх основі побудовані залежності коефіцієнтів та усереднене значення напруги у місці приєднання споживача від часу проведення експерименту (рис. 4).

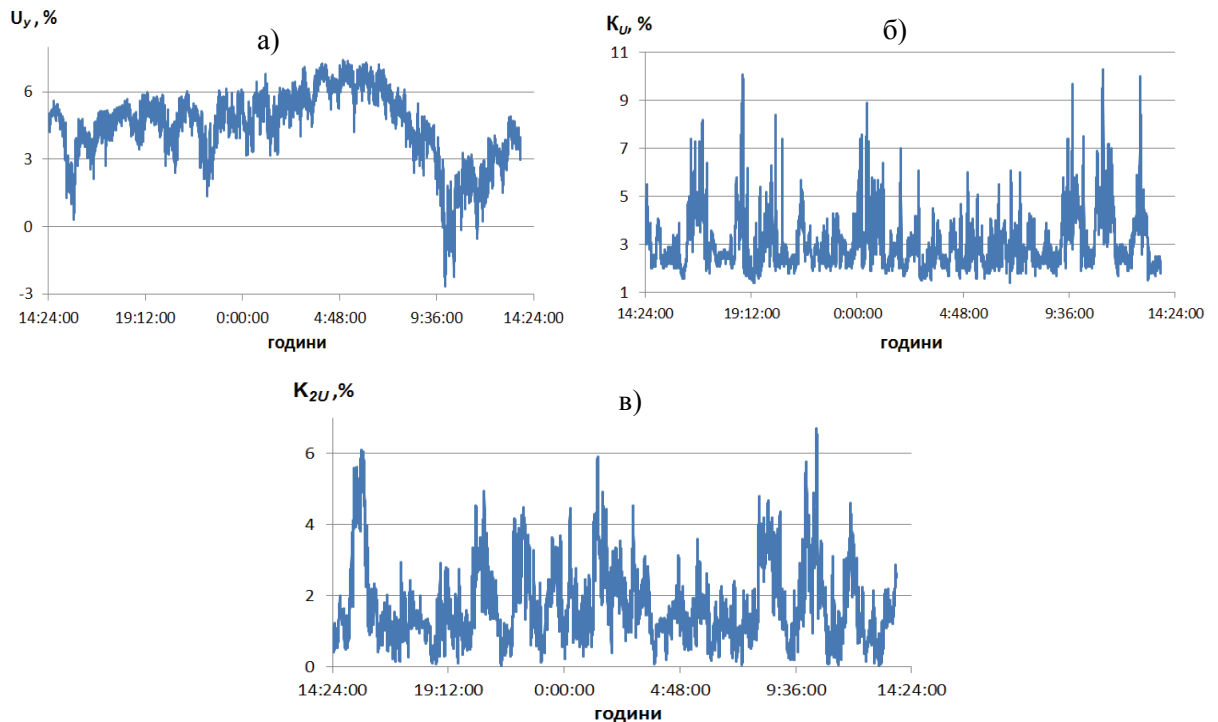


Рис. 4. Часові залежності показників якості у місці приєднання споживача під час проведення експерименту:  
а — усталене відхилення напруги; б — коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги;  
в — коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю

Під час цього експерименту визначено, що діапазон відхилень напруги на об'єкті коливався в межах 2,66...7,42% (10...28 В), коефіцієнт спотворення синусоїди напруги — 1,5...10,3%, коефіцієнт несиметрії напруги — 0,1...6,7%. Погіршення якості електроенергії спостерігалось під час проїзду електрорухомого складу на міжпідстанційній зоні.

### Статистична обробка та аналіз отриманих результатів

У цій частині проведено аналіз стану якості електричної енергії, що передається споживачу лінією ДПР з використанням методів статистичної оцінки випадкових величин. Вище зазначалось, що на якість електроенергії у лінії ДПР впливає низка як виключно конструкційних, так і ймовір-

нісних факторів. До останніх можна віднести коливання напруги на шинах підстанції, струмове навантаження лінії, електромагнітний вплив від тягового струму.

На основі отриманих експериментальних даних розраховані функції розподілу щільності імовірності та інтегральні функції розподілу імовірності показників якості (рис. 5—10) та розраховані їх числові характеристики (табл. 1).

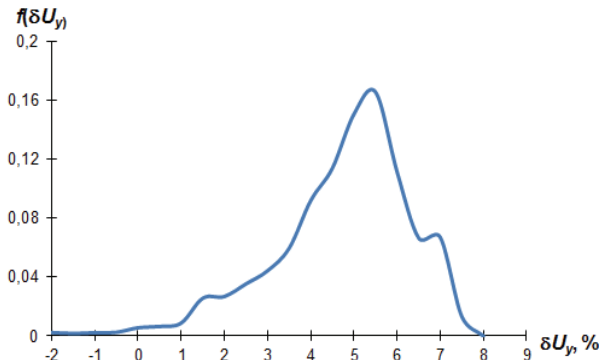


Рис. 5. Функція розподілу щільності імовірності усталеного відхилення напруги

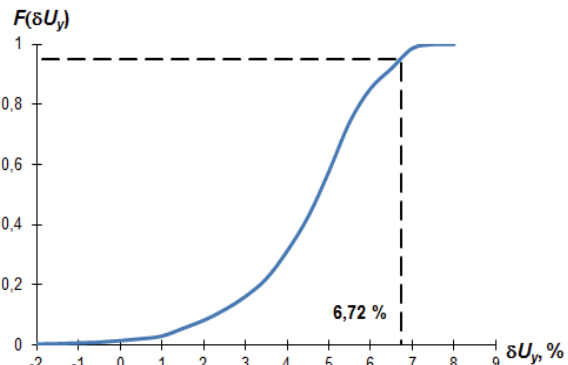


Рис. 6. Інтегральна функція розподілу імовірностей усталеного відхилення напруги

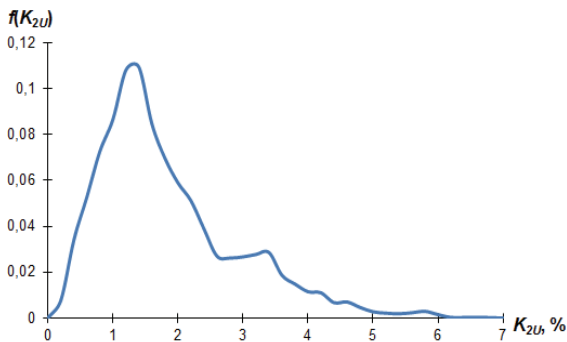


Рис. 7. Функція розподілу щільності імовірності коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю

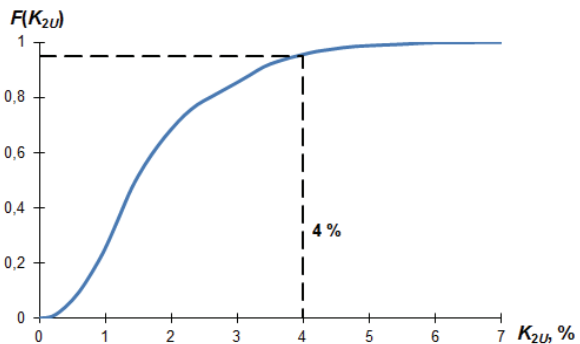


Рис. 8. Інтегральна функція розподілу імовірностей коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю

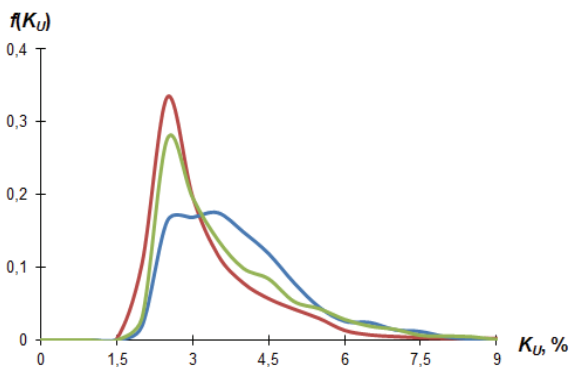


Рис. 9. Функції розподілу щільності імовірності коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги у фазах

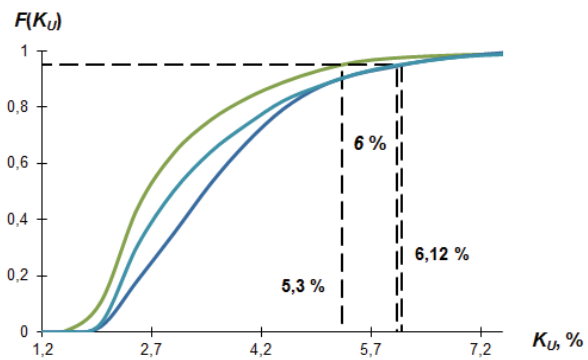


Рис. 10. Інтегральні функції розподілу коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги у фазах

Зазначимо, що згідно з [5] якість електричної енергії забезпечується у випадку, коли визначені під час вимірювання показники не перевищують гранично допустимі значення, та з вірогідністю 95 % не перевищують нормально допустимі значення, установлені в стандарті. У зв'язку з цим, на діаграмах функції розподілу ймовірностей (див. рис. 6, 8, 10) показано точки на осі ординат, що визначають вірогідність 95 %, та відповідні їм значення на осі абсцис. За цією умовою, недопустиму імовірність появи понаднормативного значення мають показники, що характеризують ступінь несиметрії та відхилення напруги живлення (табл. 2). За гранично допустимі значення виходять усталене відхилення напруги та коефіцієнт несиметрії напруги, а верхня межа діапазону зміни коефіцієнта несинусоїдності на 2 % нижча нормативного значення.

Числові характеристики досліджуваних показників якості електроенергії

Показник	$\delta U_y, \%$	$K_U, \%$			$K_{2U}, \%$
		A	B	C	
Математичне очікування M	4,48	3,07	3,69	3,44	1,75
Мода Mo	5,37	2,30	2,50	2,30	1,19
Медіана Me	4,74	2,70	3,50	3,00	1,46
Дисперсія D	2,50	1,39	1,47	1,68	1,16
Середнє квадратичне відхилення s	1,58	1,18	1,21	1,30	1,07
Коефіцієнт асиметрії As	-0,96	1,94	0,98	1,35	1,15
Екссес Ex	1,29	5,34	0,79	1,68	1,23

Таблиця 2

Порівняння визначених показників якості електроенергії з нормативними

Показник якості	$\delta U_y, \%$	$K_U, \%$ (для 0,38 кВ)	$K_{2U}, \%$
Нормально допустиме значення	$\pm 5$	8	2
Значення показника за імовірності 95 %	6,72	6,12	4
Гранично допустиме значення	$\pm 10$	12	4
Найбільше абсолютне значення показника	7,42	10,3	6,7

### Висновки

За результатами поданих експериментальних досліджень та аналізу отриманих даних можна зробити висновок, що якість електричної енергії у споживача, обладнання якого отримує живлення від лінії ДПР, не відповідає встановленим вимогам. Причиною цього є конструкція та умови роботи лінії живлення, що перебуває під впливом електромагнітного поля контактної мережі. Таким чином, постає задача приведення якості електроенергії до належного стану. Можливі заходи з цього приводу можуть полягати як у ліквідації ліній ДПР, так і їх віднесенні від залізничної колії чи їх реконструкції у звичайні трифазні. Можливим перспективним рішенням для покращення якості електроенергії є забезпечення двостороннього живлення лінії ДПР за допомогою фазувального пристрою. Робота у цьому напрямі дозволить збільшити ефективність передачі електроенергії та підвищити надійність електропостачання нетягових сторонніх та залізничних споживачів.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, та Д. О. Босій, *Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць*. Дніпро, Україна: Стандарт-Сервіс, 2015, 340 с.
- [2] D. O. Bosiy, "Power quality complex estimation at alternating current traction substations", *Наука та прогрес транспорту*, № 4 (46), pp. 30-37, 2013.
- [3] А. Б. Косарев, *Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока*. М, Россия: Интекст, 2004, 272 с.
- [4] И. В. Жежеленко, и Ю. Л. Саенко, *Качество электрической энергии на промышленных предприятиях*. М., Россия: Энергоатомиздат, 2005, 261 с.
- [5] ГОСТ 13109-97. *Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения*. К., Украина: Госстандарт Украины, 1999, 32 с.
- [6] А. И. Тамазов, *Несимметрия токов и напряжений, вызываемая однофазными токовыми нагрузками*. М., Россия: Транспорт, 1965, 235 с.
- [7] М. П. Ратнер, и Е. Л. Могилевский, *Электроснабжение нетяговых потребителей железных дорог*. М., Россия: Транспорт, 1985, 295 с.
- [8] А. Н. Журавлев, «Система электроснабжения нетяговых потребителей на электрифицированных железных дорогах переменного тока», автореф. дис. канд. техн. наук. Москва, Россия, 2005, 24 с.
- [9] Т. Э. Финоченко, «Повышение качества электроэнергии в линиях «два провода–рельс» в условиях электромагнитного влияния тяговой сети переменного тока», автореф. дис. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, Россия: 2006, 20 с.
- [10] В. П. Закарюкин, и А. В. Крюков, «Качество электроэнергии в линиях электропередачи «два провода–рельс» *Електрифікація транспорту*, № 7, с. 84-91, 2014.
- [11] А. С. Бочев, и Т. Э. Финоченко, «Устройство для электроснабжения нетяговых потребителей на электрифицированных участках железных дорог переменного тока», *Пат. на полезную модель РФ № 42484 МПК: В60М1/02*, 12.07.2004.

[12] А. Н. Журавлев, А. Б. Косарев, Б. И. Косарев, и В. В. Хананов, «Система электроснабжения нетяговых потребителей на электрифицированных участках железных дорог, Пат. на полезную модель РФ № 47819 МПК: В60М3/00 В60М1/12, 23.03.2005.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 5.01.2018

**Земський Денис Романович** — аспірант кафедри інтелектуальних систем електропостачання, ORCID: [orcid.org/0000-0003-4322-0727](https://orcid.org/0000-0003-4322-0727), e-mail: [d.zemskiy@ukr.net](mailto:d.zemskiy@ukr.net).

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро

**D. R. Zemskiy<sup>1</sup>**

## **Experimental Research of Power Quality at Consumers Getting Electricity from the Line TWR 27, 5 kV of Alternating Current Railways**

<sup>1</sup>Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan

*The article deals with results of an experimental research of power quality at the consumer, which receives power from the line TWR (two wire and rail) of AC railways. The main factors that affect the quality of electricity in the line were considered. The analysis and statistical estimation of the data obtained during the measurements were carried out. The reliable operation of electrical equipment and power loss are highly dependent on the quality of electricity and, in the same time, companies have become less tolerant of production stoppages. Power supply of industrial and domestic consumers from the traction system has long been practiced in Ukraine. There are indications that power quality in the system of these consumers worsens but no conclusive results are available due to the lack of researches. The power for some electrical consumers is obtained from 25 kV bus of traction substations where electric locomotives and traction system creates a negative impact on the voltage quality. On the other hand, the power quality is deteriorated, due to the design of the power line, which consists of two wires and rails. The typical conditions of operating AC traction network when the currents on the three wires of a three-phase system are not equal or are not at an exact 120° phase angle. Also voltage dip and harmonic distortion are significant concerns for consumers. Thus, the negative effect of the transmission line is greater than the effect from equipment of the consumers. A study was made of the power quality in system of non traction consumer. A portable power quality analyzer is used to measure current, voltage values and quality parameters. Duration of measurements is 24 hour GOST 13109-97. The mathematical statistics methods are used to analysis total harmonic distortion, voltage magnitude variations and voltage unbalance. Input data is obtained by the measurement under operating conditions of traction substation. During the investigation, the levels of the negative impact of the traction load on the quality of electricity are determined. It was concluded that the power quality does not meet the requirements of standard.*

**Keywords:** lines two wire-rails, electromagnetic compatibility, electricity quality, non-traction consumers.

**Zemskiy Denys R.** — Post-Graduate Student of the Chair of Intelligent Power Supply Systems ORCID: [orcid.org/0000-0003-4322-0727](https://orcid.org/0000-0003-4322-0727), e-mail: [d.zemskiy@ukr.net](mailto:d.zemskiy@ukr.net)

**Д. Р. Земский<sup>1</sup>**

## **Экспериментальное исследование качества электроэнергии у потребителей, которые питаются от линии ДПР железных дорог переменного тока**

<sup>1</sup>Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

*Представлены результаты экспериментального исследования качества электрической энергии у потребителя, получающих питание от линии ДПР железных дорог переменного тока. Рассмотрены основные факторы, влияющие на качество электроэнергии в линии. Проведен анализ и статистическая оценка измеренных данных.*

**Ключевые слова:** линии два провода–рельс, электромагнитная совместимость, качество электроэнергии, неторговые потребители.

**Земский Денис Романович** — аспірант кафедри інтелектуальних систем електропостачання, ORCID: [orcid.org/0000-0003-4322-0727](https://orcid.org/0000-0003-4322-0727), e-mail: [d.zemskiy@ukr.net](mailto:d.zemskiy@ukr.net)