

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри

_____ /Д. О. Босий/

« _____ » _____ 20 ____ р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Підвищення якості електроенергії в лінії ДПР**

Theme **Improving the quality of electricity in the DPR line**

Керівник дипломної роботи

проф. _____ Д. О. Босий

Нормоконтролер

доц. _____ В. М. Ляшук

Студентка групи ЕС1921

_____ В. Р. Хоменко

Student

Khomenko Valentyna

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Факультет «Управління енергетичними процесами»
Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»
Галузь 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація Електротехнічні системи електроспоживання

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри

Сиченко В.Г.

« 20 » січня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

студента групи 265М Хоменко Валентина Романівна

1 Тема дипломного проекту «Підвищення якості електроенергії в лінії ДПР»
затверджена наказом по університету від «17» січня 2020 р. № 55 ст.

2 Термін подання студентом закінченого проекту «17» грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту: однолінійна схема, схема живлення і секціонування контактної мережі.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): Причини зниження якості електроенергії в лініях ДПР, вплив показників якості електроенергії на роботу споживачів лінії ДПР, аналіз існуючих способів підвищення ЯЕ в лініях ДПР, розрахунок втрат енергії в лінії ДПР реальної ділянки Слобідка-Чубівка.

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу)

Схема живлення і секціонування контактної мережі, методи розрахунку, вплив показників якості.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Обсяг розділу, %
Вступ	09.09	2
Проблеми експлуатації лінії технологічної інфраструктури залізниць.	21.10	17
Оцінка якості електричної енергії, що передається лінією «два проводи-рейка».	11.11	25
Методи підвищення якості електроенергії в лініях ДПР.	25.11	30
Оптимізація та підвищення якості електроенергії в системі електропостачання залізниці для нетягових споживачів.	09.12	23
Висновки	15.12	2
Список використаних джерел	16.12	1

Дата видачі завдання: « 20 » січня 2020 р.

Керівник дипломного проекту:

_____ Д.О. Босий

Завдання прийняв до виконання:

_____ В.Р. Хоменко

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 93 сторінок, складається з 4 розділів, та містить 43 ілюстрації, 23 таблиці, 25 бібліографічних джерел.

Розглядаються проблеми експлуатації лінії технологічної інфраструктури, які полягають в зниженні якості електроенергії та відповідних впливах на роботу електроспоживачів.

Аналіз якості електроенергії виконаний з урахуванням магнітного, електромагнітного та гальванічного впливів та врахуванням різних способів підключення суміжних підстанцій до живлячої мережі.

В даній роботі розглянуті методи підвищення якості електроенергії, виконані оцінювальні розрахунки для реальної ділянки Одеської залізниці.

Ключові слова: ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ЗМІНИЙ СТРУМ, ТЕХНОЛОГІЧНА ІНФРАСТРУКТУРА, ВТРАТИ, ЛІНІЯ «ДВА ПРОВІДИРЕЙКА», НЕТЯГОВЕ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ФАЗОПОВОРОТНИЙ ПРИСТРІЙ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІНІЙ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАЛІЗНИЦЬ	9
1.1 Причини зниження якості електроенергії в лініях ДПР	9
1.2 Вплив показників якості електроенергії на роботу споживачів лінії ДПР	11
1.3 Вплив- якості електроенергії на роботу пристроїв залізничної автоматики та електромагнітна сумісність ліній ДПР і рейкових кіл	21
2 ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЩО ПЕРЕДАЄТЬСЯ ЛІНІЄЮ ДПР	25
2.1 Магнітний вплив тягової мережі змінного струму на систему трифазних напруг	25
2.2 Електричний вплив контактної мережі	31
2.3 Гальванічний вплив тягових струмів	36
3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЛІНІЯХ ДПР	40
3.1 Методика вимірювання показників якості	40
3.2 Результати вимірювання показників якості у споживача на ділянці залізниці між підстанціями Чубівка-Слобідка	48
3.3 Оцінка адекватності методу розрахунку на основі експериментальних даних	62
4 ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗАЛІЗНИЦІ ДЛЯ НЕТЯГОВИХ СПОЖИВАЧІВ	66
4.1 Моделювання системи електропостачання залізниці при односторонньому живленні нетягових споживачів	66
4.2 Моделювання двостороннього живлення нетягових споживачів	72

4.3	Моделювання двостороннього живлення нетягових споживачів від трипровідної лінії із використанням фазоповоротного пристрою.....	78
4.4	Зіставлення та аналіз результатів моделювання.....	85

5 ВИСНОВКИ

6 СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

Актуальність роботи. Актуальність обраної теми обумовлена проблемами ефективного використання енергетичних ресурсів та забезпечення надійності роботи обладнання. В електроенергетиці одним із способів вирішення вказаних проблем є зниження технологічних втрат електроенергії та забезпечення електромагнітної сумісності працюючих пристроїв. Електрорухомий склад залізниць змінного струму є потужним нелінійним споживачем, що чинить асиметруючий вплив на трифазні мережі та генерує вищі гармоніки до систем зовнішнього та нетягового електропостачання.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Обране дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, зокрема за наступною темою: «Забезпечення паралельної роботи та підвищення якості електроенергії у лініях електропостачання нетягових споживачів залізниць змінного струму», № держреєстрації 0119U103771.

Мета і завдання роботи.

Метою роботи є підвищення ефективності передачі електричної енергії лініями, які гальванічно пов'язані з тяговою мережею.

Об'єкт дослідження – Процес передачі електроенергії лініями, що гальванічно зв'язані із тяговою мережею.

Предмет дослідження – Ефективність електропостачання, яка оцінюється обсягом втрат електроенергії та ступенем погіршення її якості при передачі.

Методи дослідження – При аналізі результатів експериментальних вимірювань показників якості електричної енергії використано методи визначення числових характеристик розподілу випадкової величини, метод визначення критерію узгодженості Пірсона для перевірки гіпотези про тип закон розподілу та непараметричного коефіцієнта кореляції Спірмена для

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

визначення зв'язку між показниками несиметрії напруги та стуму. Застосовано методи математичного та комп'ютерного моделювання системи електропостачання у фазних координатах із урахуванням нелінійних параметрів електрорухомого складу під час дослідження способів живлення нетягових споживачів.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист.

Розроблено комплексну математичну модель взаємодії систем зовнішнього, тягового та нетягового електропостачання залізниці змінного струму, яка відрізняється від існуючих з врахуванням різних схем підключення тягових підстанцій до живлячої мережі, несиметрії та несинусоїдності тягового навантаження, параметрів магнітного кола трансформаторів та конструктивного виконання ліній нетягового електропостачання, що дозволяє достовірно визначити втрати та показники якості електроенергії у системі електропостачання для несиметричних та несинусоїдних режимів роботи.

Практична цінність роботи.

Отримані аналітичні вирази показників несиметрії напруги для схем одностороннього та двостороннього живлення ліній «два проводи-рейка» у вигляді сукупності статистичних законів розподілу та рівнянь регресії дозволяють кількісно оцінити несиметрію напруги при реалізації окремої схеми живлення та показують зниження несиметрії при реалізації двосторонньої схеми живлення.

Особистий внесок здобувача.

Постановку мети та задачі дослідження виконано спільно з науковим керівником. Здобувачем самостійно проведені розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих під час експериментальних досліджень результатів, формулювання висновків.

Апробація результатів магістерської роботи.

Основні положення роботи та результати були представлені здобувачем на III Міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність та

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

енергетична безпека електроенергетичних систем» (Харків, 12-15 листопада 2019 р.)

Публікації за тематикою роботи

Босий Д. О., Земський Д. Р., Хоменко В. Р. Аналітичне порівняння показників якості електроенергії за двома стандартами у мережі нетягового споживача залізниці змінного струму. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Енергетика: надійність та енергоефективність»*. 2019. № 29. С. 27-3

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						9
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛІНІЇ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАЛІЗНИЦЬ

1.1 Причини зниження якості електроенергії в лініях ДПР

На сьогоднішній день лінії поздовжнього електропостачання набули широкого поширення для живлення нетягових споживачів на електрифікованих ділянках залізниць змінного струму, виконані за системою ДПР. З появою цих ліній було вирішено питання про комплексне електропостачання від шин тягових підстанцій (ТП) змінного струму тягових навантажень і навантажень нетягових споживачів. Розміщення проводів ДПР на опорах контактної мережі (КС), використання в якості третьої фази системи ДПР рейкового ланцюга і відсутність додаткової обмотки тягового трансформатора для живлення ліній поздовжнього електропостачання дозволило найбільш економічно вигідним способом здійснювати електропостачання нетягових споживачів. Окрім цього, поява ліній ДПР в середині ХХ століття мала колосальне соціальне значення, дозволяючи розвивати економіку прилеглих до залізниці районів і енергетику. Для багатьох споживачів лінія ДПР була та досі є єдиним можливим джерелом живлення.

Однак переваги системи ДПР і визначають її основні недоліки, які при детальному розгляді нині зводять весь економічний ефект впровадження ліній ДПР практично до нуля. Відомо, що якість напруги на шинах ТП змінного струму, від яких отримують живлення і лінії ДПР, під впливом тягового навантаження знижено. Нерівномірний розподіл між фазами тягового трансформатора однофазного тягового навантаження плечей живлення обумовлює наявність несиметрії напруг, а робота випрямних електровозів змінного струму спотворює криву напруги на шинах ТП [1]. Таким чином, вже на початку лінії ДПР в системі напруг з'являються напруги зворотної послідовності і вищі гармонійні складові.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						10
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Існує ще кілька аспектів зниження ЯЕ в лінії. Розміщення лінії ДПР на опорах КМ обумовлює її роботу в потужному електромагнітному полі, створеним тяговою мережею змінного струму. При цьому в лінію ДПР індукуються додаткові напруги і струми, що значно впливають на режим її роботи. Крім того, різні параметри проводів і рейок роблять лінію ДПР несиметричною. Якщо під дією тягових струмів в контурах «провід – земля» ДПР індукується поздовжня електрорушійна сила (ЕРС), досягає величини до 5,5 кВ, то в контурі «рейки – земля» лінії ДПР як в провідному середовищі ця ЕРС скомпенсована створеним нею падінням напруги. Тому потенціал рейкового кола по відношенню до землі при магнітному впливі тягової мережі, на відміну від потенціалів проводів системи ДПР, не зміниться. У сукупності два фактора – вплив електромагнітного поля тягової мережі і використання в якості третьої фази рейок – є основними причинами різкої несиметрії напруги в місці підключення комплектної трансформаторної підстанції (КТП) споживачів до лінії ДПР. Особливо схильні до такого впливу споживачі, найбільш віддалені від ТП. Під впливом тягових струмів коефіцієнт несиметрії системи напруг за зворотною послідовністю на приймальному кінці лінії ДПР без урахування зниження ЯЕ на шинах ТП досягає значних величин (до 10,9%) і не відповідає нормам ГОСТ 13109-97. Наявність напруги зворотної послідовності значно знижує рівень напруги в ДПР. При цьому показники ЯЕ по відхиленню напруги в деяких фазах перевищують гранично допустимі норми зазначеного стандарту. Форма кривої напруги системи ДПР в місці підключення споживачів значно відрізняється від форми кривої напруги на шинах ТП. Це пов'язано з тим, що індукуючись в лінію ДПР поздовжня ЕРС магнітного впливу тягової мережі містить вищі гармонійні складові тягового струму. Індукуючи в лінію ДПР з амплітудою, пропорційної порядку гармоніки, вищі гармонійні складові тягового струму значно спотворюють синусоїду напруги у споживачів. При цьому коефіцієнт спотворення форми кривої напруги в кінці лінії ДПР при магнітному впливі тягової мережі може досягати до 12%, що в кілька разів перевищує гранично допустиму норму.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						11
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крім того, зниження ЯЕ в місці підключення споживачів ДПР відбувається при гальванічному впливі тягових струмів. При проходженні поїзда в місці підключення споживачів ДПР потенціал рейок по відношенню до землі може досягати значень до 600 В і більше, що вносить додаткову несиметрію в систему напруг ДПР.

Таким чином, якість напруги у споживачів в місці підключення до лінії ДПР по несиметрії, відхиленню і несинусоїдальності напруги, зважаючи на вказані раніше причини, не відповідає сучасним вимогам.

Необхідно відзначити, що якщо проблемам ЯЕ на шинах ТП змінного струму в даний час приділяється значна увага, то проблема зниження ЯЕ у споживачів ДПР при електромагнітному впливі тягової мережі залишається відкритою. Проте, дана проблема в умовах щорічного підвищення тарифів на електричну енергію є такою ж актуальною, як і проблема ЯЕ на шинах ТП змінного струму. Виходячи з цих положень, оцінимо вплив показників ЯЕ на роботу споживачів, які отримують живлення від лінії ДПР.

1.2 Вплив показників якості електроенергії на роботу споживачів лінії ДПР

Як відомо, проблема ЯЕ безпосередньо пов'язана з питаннями економії електроенергії і зниження експлуатаційних витрат. Зазвичай вважається, що робота всіх електроприймачів і апаратів найбільш доцільна з технічної та економічної точок зору при номінальних параметрах. Погіршення показників ЯЕ призводить до певних витрат. В першу чергу ці витрати пов'язані з втратами електроенергії внаслідок низької ЯЕ в лінії ДПР, в трансформаторах і різних електроприймачах споживачів. Дійсно, поява індукованої тяговими струмами напруги зворотної послідовності призводить до появи в лінії ДПР необумовленого струмом навантаження додаткових витрат електроенергії, які можуть становити до 13% витрати електроенергії, відпущеної від шин ТП.

Крім втрат і недообліку електроенергії низька якість напруги в лінії ДПР призводить до скорочення термінів служби устаткування і до технологічного

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						12
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збитку. Вплив ЯЕ на термін служби електроустаткування проявляється в основному в перевищенні температури провідників і ізоляції над допустимими значеннями, що призводить до їх прискореного старіння .

Технологічний збиток від низької ЯЕ в лінії ДПР пов'язаний зі значними витратами. Особливо негативно низька ЯЕ впливає на роботу пристроїв залізничної автоматики, що використовують лінії ДПР як джерело резервного живлення. Крім того, використання рейкового кола в якості третьої фази лінії ДПР негативно впливає на роботу рейкових кіл автоблокування. Відмова в роботі даних пристроїв, що пов'язана з загрозою безпеки руху поїздів, порушенням графіку руху та зі значними матеріальними збитками.

Для оцінки впливу показників ЯЕ системи ДПР на роботу електрообладнання споживачів визначимо перелік їх основного обладнання. Підприємства залізничного транспорту, підключені до ліній ДПР, є енергоємними споживачами електричної енергії. Вони оснащені загальнопромисловим і нетиповим обладнанням та електроприймачами, такими як електродвигуни, зварювальні трансформатори, нагрівальні, плавильні й сушильні електропечі, джерела світла, перетворювачі, гальванічні, термічні установки та ін. Структура встановленої потужності різних підприємств залізничного транспорту показує, що найбільшу частку (від 32 до 92%) в господарстві основних підприємств складає встановлена потужність електроприводів [2] . Електродвигуни застосовуються в приводах різних виробничих механізмів. В установках, що не вимагають регулювання частоти обертання в процесі роботи, застосовуються електроприводи змінного струму: асинхронні і синхронні електродвигуни. Велике поширення асинхронних двигунів зумовлено їх простотою у виконанні та експлуатації, і відносно невисокою ціною. Синхронні двигуни мають ряд переваг в порівнянні з асинхронними: зазвичай використовуються в якості джерел реактивної потужності, їх обертаючий момент менше залежить від напруги на затискачах, у багатьох випадках вони мають більш високий ККД. У той же час синхронні двигуни є більш дорогими і складними у виготовленні і експлуатації.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						13
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Широке застосування (до 18%) встановленої потужності отримало електрозварювання, для якого застосовують різні зварювальні трансформатори - перетворювачі і випрямні установки. Однак витрати електроенергії на електрозварювання в сумарному електроспоживанні підприємств становлять від 1 до 14%. Сумарна встановлена потужність освітлювальних установок для більшості підприємств коливається в межах 1 – 10%, а витрати електроенергії становлять велику частку і досягають в деяких випадках 20%. Крім того, для зниження напруги на підприємствах залізничного транспорту використовуються трансформатори різної потужності. На багатьох підприємствах використовуються різні системи автоматичного управління, що містять електронні елементи, чутливі до ЯЕ.

Одним з основних показників ЯЕ є усталене відхилення напруги від номінальної напруги електричної мережі. Саме цей показник ЯЕ має найбільший вплив на величину втрат електроенергії в мережі і електрообладнанні.

Згідно ГОСТ 13109-97 ЯЕ відповідає вимогам стандарту, якщо всі виміряні за кожну хвилину протягом доби значення усталеного відхилення напруги в мережі знаходяться в інтервалі, обмеженому гранично допустимим значенням в $\pm 10\%$, а не менше 95% виміряних значень не перевищують нормально допустиме значення в $\pm 5\%$. Стале значення відхилення напруги на приймальному кінці лінії ДПР в деяких фазах внаслідок електромагнітного впливу тягової мережі значно перевищує гранично допустиме значення і не відповідає нормам стандарту.

Відхилення напруги значно впливають на роботу асинхронних двигунів, які є найбільш поширеними приймачами електроенергії не тільки на залізничному транспорті, а й в промисловості.

При зміні напруги змінюється механічна характеристика асинхронного двигуна - залежність його обертаючого моменту M від ковзання S або частоти обертання. З достатньою точністю можна вважати, що обертаючий момент двигуна пропорційний квадрату напруги на його виходах. При зниженні напруги зменшується обертовий момент і частота обертання ротора двигуна, так як

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						14
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшується його ковзання. Зниження частоти обертання залежить також від закону зміни моменту опору M_c і від завантаження двигуна. Залежність частоти обертання ротора двигуна від напруги можна виразити:

$$n = n_c \left(1 - k_3 \frac{U_{ном}^2}{U^2} \cdot S_{ном} \right), \quad (1.1)$$

де n_c - синхронна частота обертання;

k_3 - коефіцієнт завантаження двигуна;

$U_{ном}, S_{ном}$ - номінальні значення напруги і ковзання відповідно.

З формули (1.1) видно, що при малих завантаженнях двигуна частота обертання ротора буде більше номінальної частоти обертання (при номінальному завантаженні двигуна). У таких випадках зниження напруги не призводять до зменшення продуктивності технологічного устаткування, так як зниження частоти обертання двигунів нижче номінальної не відбувається. Для двигунів, що працюють з повним навантаженням, зниження напруги призводить до зменшення частоти обертання. Якщо продуктивність механізмів залежить від частоти обертання двигуна, то на виводах таких двигунів рекомендується підтримувати напругу не нижче номінальної. При значному зниженні напруги на виводах двигунів, що працюють з повним навантаженням, момент опору механізму може перевищити обертаючий момент, що приводить до «перекидання» двигуна, тобто до його зупинки. Щоб уникнути пошкоджень двигун необхідно відключити від мережі. Зниження напруги погіршує і умови пуску двигуна, так як при цьому зменшується його пусковий момент.

Практичний інтерес представляє залежність споживаної двигуном активної і реактивної потужності від напруги на його виводах. У разі зниження напруги на затискачах двигуна реактивна потужність намагнічування зменшується (на 2...3%

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						15
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

при зниженні напруги на 1%), при тій же споживаній потужності збільшується струм двигуна, що викликає перегрів ізоляції. Якщо двигун довго працює при зниженій нарузі, то через прискорений знос ізоляції термін служби двигуна зменшується. Наближено термін служби ізоляції можна визначити за формулою:

$$T = \frac{T_{ном}}{R}, \quad (1.2)$$

де $T_{ном}$ – термін служби ізоляції двигуна при номінальній нарузі та номінальному навантаженні;

R – коефіцієнт, що залежить від значення і знака відхилення напруги, а також від коефіцієнта завантаження двигуна і рівний:

$$R = (47 \cdot \delta \cdot U^2 - 7,55 \cdot \delta \cdot U + 1) \cdot k_3^2, \quad (1.3)$$

при $-0,2 < \delta \cdot U < 0$.

$$R = k_3^2, \quad (1.4)$$

при $0,2 \geq \delta \cdot U > 0$.

Тому з точки зору нагріву двигуна більш небезпечні в розглянутих межах від'ємні відхилення напруги. Зниження напруги призводить також до помітного зростання реактивної потужності, що втрачається в реактивних опорах розсіювання трансформаторів і асинхронних двигунів.

Підвищення напруги на виводах двигуна призводить до збільшення споживаної ними реактивної потужності. При цьому питоме споживання реактивної потужності зростає зі зменшенням коефіцієнта завантаження двигуна. В середньому на кожен відсоток підвищення напруги споживана реактивна потужність збільшується на 3% і більше (в основному за рахунок збільшення

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						16
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

струму холостого ходу двигуна), що в свою чергу призводить до збільшення втрат активної потужності в елементах електричної мережі.

Лампи розжарювання характеризуються номінальними параметрами: споживаної потужністю $P_{ном}$, світловим потоком $F_{ном}$ світловою віддачею $\eta_{ном}$ (рівній відношенню випромінюваного лампою світлового потоку до її потужності) і середнім номінальним терміном служби $T_{ном}$. Ці показники в значній мірі залежать від напруги на виходах ламп розжарювання. При відхиленнях напруги на 10% ці характеристики наближено можна описати наступними емпіричними формулами:

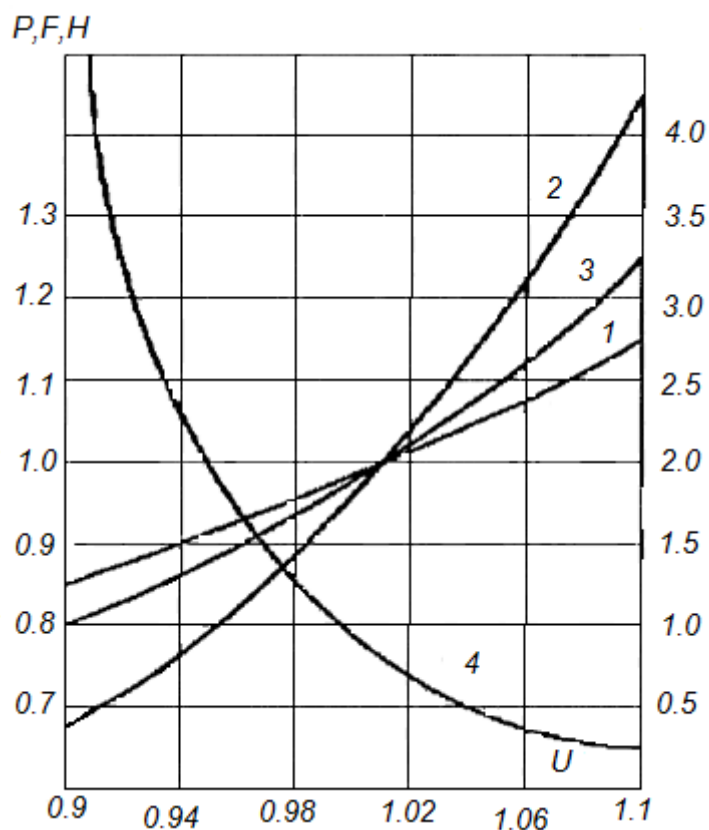
$$P_{o.6} = \frac{P}{P_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^{1,53} \quad (1.5)$$

$$F_{o.6} = \frac{F}{F_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^{3,67} \quad (1.6)$$

$$T_{o.6} = \frac{T}{T_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^{-14,8} \quad (1.7)$$

$$\eta_{o.6} = \frac{\eta}{\eta_{ном}} = \left(\frac{U}{U_{ном}} \right)^{2,14} \quad (1.8)$$

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						17
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



1 - споживана потужність; 2 - світловий потік;
3 - світлова віддача; 4 - термін служби

Рисунок.1.1- Залежності характеристик ламп розжарювання від напруги

З кривих на рис. 1.1 видно, що зі зниженням напруги найбільш помітно падає світловий потік. При підвищенні напруги більш ніж номінальна збільшується світловий потік F , потужність лампи P і світлова віддача η , але різко знижується термін служби ламп T , і в результаті вони швидко перегорають. При цьому виникає перевитрата електроенергії. Зміна напруги призводять до відповідних змін світлового потоку і освітленості, що, в кінцевому підсумку, впливає на продуктивність праці і стомлюваність людини.

Люмінесцентні лампи менш чутливі до відхилень напруги. При підвищенні напруги споживана потужність і світловий потік збільшуються, а при зниженні - зменшуються, але не в такій мірі, як у ламп розжарювання. При зниженій напрузі умови запалювання люмінесцентних ламп погіршуються, тому термін їх служби, який визначається розпиленням оксидного покриття електродів, скорочується як

при додатніх, так і при від'ємних відхиленнях напруги. При відхиленнях напруги на 10% термін служби люмінесцентних ламп в середньому знижується на 20...25%. Істотним недоліком люмінесцентних ламп є споживання ними реактивної потужності, яка зростає із збільшенням напруги, що до них підводиться.

Електричні печі чутливі до відхилень напруги. Зниження напруги електродугових печей, наприклад на 7%, призводить до подовження процесу плавки стали в 1,5 рази. Підвищення напруги вище 5% призводить до перевитрати електроенергії

Відхилення напруги негативно впливають на роботу електрозварювальних машин: наприклад, для машин точкового зварювання при зміні напруги на 15% виходить 100% брак продукції.

Як зазначалося раніше, поява напруг і струмів зворотної послідовності призводить до додаткових втрат потужності і енергії, а також втрат напруги в лініях ДПР, що погіршує режими і техніко-економічні показники їх роботи. Накладення напруги зворотної послідовності призводить до різних додатковим відхилень напруги в різних фазах ДПР. В результаті напруга може вийти за допустимі межі. При несиметричному режимі істотно погіршуються умови роботи як самих електроприймачів, так і всіх елементів мережі, знижується надійність роботи електрообладнання та системи електропостачання в цілому [3].

Несиметрія негативно позначається на робочих і техніко-економічних характеристиках обертових електричних машин. Якісно відрізняється дія несиметричного режиму в порівнянні з симетричним на асинхронні двигуни. Особливе значення для них має напруга зворотної послідовності. Опір зворотної послідовності електродвигунів приблизно дорівнює опору загальмованого двигуна і, отже, в 5 ... 8 разів менше опору прямої послідовності. Тому навіть невелика несиметрія напруг викликає значні струми зворотної послідовності. Струм прямої послідовності в статорі створює магнітне поле, що обертається з синхронною частотою в напрямку обертання ротора. Токи зворотній

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						19
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

послідовності в статорі створюють магнітне поле, що обертається щодо ротора з подвійною синхронною частотою в напрямку, протилежному обертанню. Через ці струми подвійної частоти в електричній машині виникає гальмівний електромагнітний момент. Токи зворотної послідовності накладаються на струми прямої послідовності і викликають додатковий нагрів статора і ротора (особливо масивних частин ротора), що призводить до прискореного старіння ізоляції і зменшення заданої потужності двигуна (зменшення ККД двигуна). Так, термін служби повністю завантаженого асинхронного двигуна, що працює при несиметричній напрузі 4%, скорочується в 2 рази .

Найбільш значний вплив несиметрії напруг надає не на максимальний обертовий момент асинхронного двигуна, а на нагрівання машин. Так, при коефіцієнті несиметрії напруг за зворотною послідовністю в 10% зміна обертового моменту складе не більше 1%. У дослідженнях, проведених в на яких ґрунтується перший проект ГОСТ «Норми якості електричної енергії» запропонована формула для визначення коефіцієнта збільшення нагріву асинхронних двигунів b в залежності від рівня несиметрії і несинусоїдальності напруги, що підводиться. Якщо взяти до уваги тільки несиметрію напруги, яка визначається коефіцієнтом несиметрії по зворотній послідовності K_{2u} , то дана формула має вигляд:

$$b = 1,54 \cdot K_{2u}, \quad (1.9)$$

Виходячи з вимог гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю в точках загального приєднання до електричних мереж дорівнює 4%, що відповідає допустимому коефіцієнту збільшення нагріву двигуна в 6%. Значення несиметрії напруг на приймальному кінці лінії ДПР можуть досягати величин в 7,5...10,9% , що відповідає значенням коефіцієнта збільшення нагріву двигунів в 11,6...16,8% . Такий стан може

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						20
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призвести до скорочення терміну служби ізоляції та виходу двигунів з ладу. Несиметрія напруг призводить до зниження ККД асинхронних двигунів. Так, при $K_{2u} = 5\%$ ККД двигунів знижується на 1,5...2,0% .

При несиметричній нарузі мережі в синхронних машинах, поряд з виникненням додаткових втрат активної потужності і нагріву статора і ротора, можуть виникнути небезпечні вібрації в результаті появи знакозмінних обертаючих моментів і тангенціальних сил, пульсуючих з подвійною частотою мережі. При значній несиметрії вібрація може виявитися небезпечною, а особливо при недостатній міцності і наявності дефектів зварних з'єднань.

Несиметрична напруга значно погіршує режими роботи багатофазних вентильних випрямлячів: збільшується пульсація випрямленої напруги, погіршуються умови роботи системи імпульсно-фазового управління тиристорних перетворювачів. Дійсно, при симетричній трифазній нарузі струми, що протікають по анодам вентилів, рівні за величиною і за часом протікання. При несиметричній нарузі час горіння і величина струму, що протікає по анодам вентилів, різні. Це призводить до того, що наявна потужність випрямляча знижується, так як частина вентилів виявляється недовантаженою, в той час як інші навантажені повністю.

Конденсаторні установки при несиметрії напруг нерівномірно завантажуються реактивною потужністю по фазах, що робить неможливим повне використання встановленої конденсаторної потужності. Крім того, конденсаторні установки в цьому випадку підсилюють вже існуючу несиметрію, так як подача реактивної потужності в мережу в фазі з найменшою напругою буде менше, ніж в інших фазах (пропорційно квадрату напруги на конденсаторній установці).

Несиметрія напруг значно впливає і на однофазні електроприймачі, якщо фазні напруги не рівні, то, наприклад, лампи розжарювання, підключені до фази з більш високою напругою, мають більший світловий потік, але значно менший термін служби в порівнянні з лампами, підключеними до фази з меншим напругою. Навпаки, при низькій нарузі термін служби ламп збільшується, а

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						21
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

світловий потік зменшується. Так, при збільшенні напруги на 5% світловий потік ламп розжарювання збільшується на 20%, а термін служби зменшується в два рази. При зниженні напруги на 5% світловий потік зменшується на 18%, а термін служби збільшується в 2,4 рази. Зниження напруги на 5% призводить до того, що люмінесцентні (флуоресцентні) лампи починають працювати нестабільно. Недостатній світловий потік ламп може призвести до зниження продуктивності праці і навіть до травматизму .

Несиметрія напруг ускладнює роботу релейного захисту, веде до помилок при роботі лічильників електроенергії і т.д. Через несиметрію скорочується термін служби ізоляції трансформаторів.

1.3 Вплив показників якості електроенергії в лінії ДПР на роботу пристроїв залізничної автоматики та електромагнітна сумісність ліній ДПР і рейкових ланцюгів автоблокування

Як відомо, пристрої СЦБ і зв'язку на залізничному транспорті відносяться до першої категорії електроприймачів щодо забезпечення надійності їх електропостачання і вимагають наявності двох незалежних джерел живлення. Тимчасове припинення електропостачання даних пристроїв несе за собою небезпеку для життя людей, зрив графіка руху поїздів і принести значної шкоди залізниці. Тому в системі електропостачання залізничного транспорту на змінному струмі лінії ДПР виконують функцію резервного джерела для живлення сигнальних точок та різних пристроїв СЦБ і автоблокування. Основне живлення пристроїв автоблокування і СЦБ передбачено від спеціально призначених для них ліній 6,10 кВ СЦБ.

Для нормальної роботи даних пристроїв «Правилами технічної експлуатації залізниць» (ПТЕ) встановлені допустимі відхилення напруги в + 5% і -10% і допустима тривалість провалу напруги в 1,3 секунди. Однофазні трансформатори ЗНОМ-35, ОМ-35, що застосовуються для резервного живлення сигнальних точок, на вторинній обмотці мають номінальну напругу 220 В. Відхилення напруги в лінії ДПР [4], викликані електромагнітним впливом тягової мережі,

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						22
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводять до відхилень напруги на вторинній стороні даних трансформаторів. Дані відхилення у вимушених режимах системи тягового електропостачання в деяких фазах системи ДПР можуть досягати величин в +5 ... + 7,5% і до -13 ... -18,5%. Напруги на вторинній стороні трансформаторів сигнальних точок при переході на резерв від лінії ДПР матимуть такі ж відхилення. Тому рівень напруги на пристроях СЦБ і зв'язку при живленні їх від лінії ДПР не відповідає допустимим ПТЕ нормам і неприйнятний для нормальної роботи даних пристроїв.

Несиметрія напруги, притаманна лініям ДПР, також негативно відбивається на роботі трифазних електроустановок залізничної автоматики. Наприклад, під дією несиметрії напруги відбувається значне зниження потужності асинхронних двигунів, що застосовуються в якості електроприводів стрілочних переводів .

Слід зазначити, що проблема спільної роботи ліній ДПР і пристроїв залізничної автоматики не обмежена впливом низької якості напруги лінії ДПР. Ще одним, і не менш вагомим аспектом, є їх електромагнітна сумісність. Як відомо, під електромагнітною сумісністю розуміють здатність електротехнічного обладнання працювати задовільно в електромагнітному середовищі, не створюючи неприпустимого впливу на навколишнє середовище, а також на інше технічне обладнання . У зв'язку з цим виникають два фактора, які відносяться до області електромагнітної сумісності даних об'єктів.

З одного боку, лінії ДПР, як і тягова мережа змінного струму, роблять значний електромагнітний вплив на суміжні лінії зв'язку . Цей вплив полягає у виникненні в лініях зв'язку несинусоїдальної індуктивної напруги, яка може не тільки спотворювати електричні сигнали, але і бути небезпечною для обслуговуючого персоналу і цілісності апаратів і приладів, підключених до них. Це питання в даний час є достатньо опрацьованим і для захисту ліній зв'язку від електромагнітного впливу тягової мережі змінного струму розроблені спеціальні заходи, викладені в «Правилах защиты устройств проводной связи и проводного вещания от влияния тяговой сети переменного тока» .

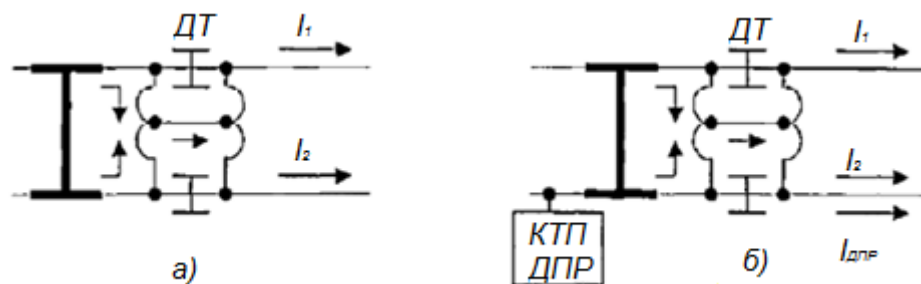
					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						23
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З іншого боку, залишається відкритим питання впливу ліній ДПР на рейкові кола автоблокування. Вважається, що для стійкої роботи рейкових кіл автоблокування необхідно, щоб рівень перешкоди, створюваний гармоніками тягового струму в рейках, не перевищував допустимих значень. При цьому практично ніколи не береться до уваги той факт, що і струми третьої фази лінії ДПР, в якості якої використовуються рейки, також беруть участь в утворенні перешкоди в дорожньому дросель -трансформаторі.

Розглянемо схему утворення перешкоди від тягового струму. Тяговий струм I_k , споживаний електровозом, розгалужуючись на струми I_1 і I_2 , має однаковий напрямок в рейкових нитках кожного рейкового кола (рис. 1.2, а). Протікаючи по колійному дроселю ДТ, змінна складова тягового струму створює на його обмотці напругу перешкоди. Подорожній дросель має вивід від середини обмотки для пропуску тягового струму в сусіднє рейкове коло в обхід ізолюючих стиків. Внаслідок цього магнітні потоки, що виникають в осерді дроселя від струму кожної рейки, протилежні за напрямком. З цієї причини в створенні перешкоди бере участь тільки різничний магнітний потік. Цей потік створюється різницею струмів в першій та другій рейках, який проходить по половині обмотки дроселя, тоді струм перешкоди у відповідному місці рейкового кола X визначиться як :

$$I_n = \frac{I_2 - I_1}{2}, \quad (1.10)$$

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						24
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а - вплив тягових струмів; б - вплив тягових струмів і струмів ДПР

Рисунок 1.2 - Вплив ліній ДПР на рейкові кола СЦБ

Якщо у випадку з тяговим навантаженням струми в рейковому колі, що стікають з обода колісної пари в кожній з рейкових ниток практично однакові, то струми навантаження третьої фази ДПР розподілені між рейковими нитками нерівномірно (рис. 1.2, б). При цьому струм перешкоди буде залежати не тільки від тягових струмів, а й від струму навантаження третьої фази ДПР:

$$I_{II} = \frac{(I_2 + I_{ДПР}) - I_1}{2}, \quad (1.11)$$

Аналізуючи (1.10) і (1.11), можна відзначити, що струм ДПР, що протікає по рейкових нитках, вносить додаткову перешкоду в роботу рейкових кіл автоблокування, а при відсутності тягового навантаження є одним з її основних джерел. Наслідками такої перешкоди може стати відмова пристроїв автоблокування, підключених до рейкових ланцюгів. У свою чергу в такій ситуації може виникнути перекриття сигналів, що суттєво погіршує умови безпеки руху поїздів, що може привести до катастроф, зриву графіка руху, значних матеріальних збитків. Таким чином, застосування рейкового кола в якості третьої фази лінії ДПР істотно впливає на роботу рейкових кіл. Тому в даний час існує необхідність у відмові від використання рейкового кола в системі ДПР, що дозволить виключити цей вплив.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						25
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 АНАЛІЗ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЛІНІЯХ ДПР

2.1 Магнітний вплив електричної тягової мережі змінного струму на систему напруг в лінії ДПР

Електричне коло при наявності в ній змінної напруги й струму, створює в навколишньому просторі змінне електромагнітне поле, що індукуює в іншому ланцюзі, що перебуває в цьому просторі, напруги й струми. Суміжні лінії піддаються з боку контактної мережі магнітному, електричному й гальванічному впливу. Лінії, розташовані безпосередньо на опорах контактної мережі, найбільш піддані цим впливам.

Магнітний вплив на лінії має місце при наявності струму в контактній мережі. Під дією струму контактної мережі у проводах, що піддані впливу лінії, індукуються додаткові поздовжні електрорушійні сили (ЕРС), які можуть досягати значних величин при більших навантаженнях. При цьому трикутник лінійної напруги на прийомному кінці лінії спотворюється, а його центр ваги виявляється зміщеним стосовно центра ваги трикутника лінійної напруги на тяговій підстанції. Індуковані ЕРС викликають додаткові, крім навантажувальних, падіння й втрати напруги в даній лінії.

Наявність випрямних установок на електровозах змінного струму визначає появу вищих гармонійних складових як у струмі контактної мережі, так і в індукованих у лініях поздовжніх ЕРС. Накладаючись на основну частоту, вищі гармонійні складові індукованих ЕРС спотворюють синусоїду напруги на прийомному кінці лінії.

Магнітне поле [5], створюване змінним струмом контактної мережі, індукуює у контурах, що включають у себе елементи системи ДПР (проводи, рейки) і землю, поздовжню ЕРС, що залежить від величини тягового струму I_k , опору взаємної індукції Z_M коефіцієнта дії, що екранує, рейок s_p і довжини зони впливу l :

$$E_k = I_k \cdot Z_M \cdot S_p, \quad (2.1)$$

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						26
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основним параметром магнітного впливу є опір взаємної індукції, що визначається як:

$$Z_M = -j \cdot \omega \cdot M, \quad (2.2)$$

де $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кутова частота, рад/с;

M – коефіцієнт взаємної індукції між ланцюгами, Гн/км.

Визначення коефіцієнта взаємної індукції пов'язане з великими труднощами через те, що земля є середовищем з досить неоднорідною провідністю. Існують формули різних авторів, що визначають дану величину з урахуванням різної будови землі. Найбільше визнання для однорідної будови землі одержали емпіричні формули Полячека й Карсона. Для спрощення розрахунків приймають будову землі однорідною. Тоді коефіцієнт взаємного впливу може бути знайдений по формулі Полячека як для однопровідного ланцюга з поверненням струму через землю:

$$M = \left(2 \ln \frac{10^4}{1,78 \cdot a \sqrt{10 \cdot \pi \cdot \omega \cdot \gamma}} - j \cdot \frac{\pi}{2} + 1 \right) \cdot 10^{-4}, \quad (2.3)$$

де a – ширина зближення,

γ – провідність землі.

Поздовжня ЕРС, що індукується струмом контактної мережі, створює в даних контурах різні падіння напруги. У короткозамкненому контурі «рейки - земля» індукована струмом контактної мережі поздовжня ЕРС, створить спад напруги, рівний їй по величині і зворотний за знаком. Якщо не враховувати гальванічну складову електромагнітного впливу контактної мережі, то потенціал рейок не змінюється.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						27
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Систему лінійної напруги ДПР створюють три контури: два з них – «проводи (фази А або В) – рейки» і третій – «провід фази А – провід фази В». Враховуючи опір рейкового кола коефіцієнтом екрануючої дії рейок, і приймаючи перехідний опір рейкового кола рівним нулю, можна розглядати трипровідну систему ДПР як дві однопровідні лінії з поверненням струму через землю. А параметри третього контуру, що складається із проводів фаз А і В, визначати через параметри двох перших контурів.

Падіння напруги, створені поздовжньою ЕРС у двох контурах «провід – земля» або у двох лінійних напругах ДПР будуть мати незначну різницю по величині, обумовлену поздовжньою і поперечною асиметрією розташування контурів стосовно контактної мережі, що впливає. Однак кути між векторами спаду напруги, і лінійними напругами системи ДПР будуть різні, і втрати лінійної напруги у фазах ДПР будуть значно відрізнятися одна від іншої.

Ситуація, коли під впливом струму контактної мережі у проводах лінії ДПР виникають додаткові спади напруги, що змінюють їхній потенціал стосовно землі, а потенціал рейок не змінюється, приводить до виникнення несиметрії напруги у системі ДПР.

Проводи ДПР розташовані безпосередньо на опорах КМ і мають найменшу в порівнянні з іншими суміжними лініями ширину зближення із контактної мережі, що коливається від 5 до 7 м. А перевага системи ДПР, виражена у відсутності витрат на установку окремих опор для розміщення повітряних проводів, при магнітному впливі стає істотним недоліком даної лінії. При цьому величина опору взаємної індукції між КМ і проводами ДПР перебуває в межах від 0,368 до 0,347 Ом/км.

Якщо величини Z_M , s_p , L , що входять у вираз (2.1), відомі або можуть бути знайдені з формул (2.2) і (2.3), то величина й напрямок струму контактної мережі I_K носить випадковий характер, що залежить від декількох показників. До них відносяться: число й маса поїздів, що одночасно перебувають на міжпідстанційній зоні, профіль колії, схема живлення тягової мережі й режим її роботи. У

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						28
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

загальному випадку можна визначити величину струму КМ як функцію, що залежить від обсягів перевезень. Крім того, крива тягового струму містить частоти, спектральний склад яких відрізняється від промислової частоти. Тому розглянемо параметри струму, що впливає, I_k більш докладно.

Вираз (2.1) показує, що величина поздовжньої ЕРС пропорційна струму КМ. Чим більше струм контактної мережі, тим істотніше позначається його магнітний вплив на ЯЕ в лінії ДПР. Як правило, тяговий струм у нормальному режимі роботи перебуває в межах від нуля до струму, допустимого за умовами нагрівання проводів контактної підвіски.

Для найпоширеніших типів контактних підвісок ця величина близька або перевищує 1000 А. При такому струмі контактної мережі величина індукованої поздовжньої ЕРС досягає значних величин: до 180 В на кілометр довжини зближення. Наприкінці 40 – кілометрової зони зближення – до 7200 В або до 26 % номінальної напруги системи ДПР.

Залежно від схеми живлення лінії ДПР і схеми живлення контактної мережі, впливаючий тяговий струм на міжпідстанційній зоні буде мати як різну величину, так і різний напрямок. На практиці лінія ДПР нормально одержує живлення з однієї сторони. Через різницю фаз на вторинній стороні суміжних ТП і щоб уникнути перетікань електроенергії двостороннє живлення лінії ДПР виключається. Тому дана лінія на ділянці між підстанціями одержує живлення або від двох підстанцій з поділом посередині, де розташовується автоматичний перемикаючий пункт, що з'єднує обидві половини при знятті на одній з них напруги, або від однієї підстанції.

Індукована струмом контактної мережі поздовжня ЕРС приймає різні значення по довжині лінії ДПР. При однобічному живленні контактної мережі і ДПР від однієї ТП на початку лінії ДПР індукована струмом контактної мережі поздовжня ЕРС має нульове значення, збільшується по довжині й приймає максимальне значення наприкінці лінії. У цьому випадку, внаслідок магнітного

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						29
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

впливу контактної мережі якість електроенергії в споживачів ДПР, розташованих наприкінці зони зближення, значно нижче, ніж у споживачів на початку лінії.

З погляду негативного впливу контактної мережі на параметри напруги лінії ДПР схема однобічного живлення контактної мережі є найбільш несприятливою, тому що в цьому випадку має місце більш високий рівень струму контактної мережі, ніж при інших схемах.

У випадку двостороннього живлення контактної мережі тягові навантаження розподіляються між двома ТП пропорційно відстаням від навантаження до ТП. Тому навантаження контактної мережі тут значно нижче, ніж при однобічному живленні. При двосторонньому живленні контактної мережі, як і при живленні від двох ТП за схемою «коротка консоль», і консольному живленні ДПР у середині лінії індуються різні за знаком ЕРС, обумовлені різним напрямком струму контактної мережі на міжпідстанційній зоні. При рівності струмів контактної мережі на суміжних тягових підстанціях сума цих ЕРС у лінії ДПР дорівнює нулю й негативний вплив тягових струмів відсутній. Більш низький рівень магнітного впливу на суміжні кола, а за певних умов повна його відсутність, є перевагою схем двостороннього живлення КМ і живлення по «короткій консолі».

Якщо в нормальному режимі струм контактної мережі близький або перевищує значення 1000 А, то в аварійному режимі при короткому замиканні (КЗ) у КМ протікає струм, що досягає декількох кілоампер. У період, обмежений часом спрацьовування захисту фідерів контактної мережі, у системі ДПР під магнітним впливом струму КЗ може виникнути різка несиметрія й провал напруги в окремих фазах. Час спрацьовування захисту, як правило, не перевищує гранично припустиму норму показника ЯЕ – тривалості провалу напруги, що складає 30 с. Однак глибина провалу напруги в системі ДПР може досягати значних величин і негативно позначатися на апаратурі споживачів, що перебувають в роботі.

Крім величини і напрямку тягового струму на магнітний вплив від контактної мережі, впливає і якісна складова. На тягових електровозах

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						30
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здійснюється перетворення однофазного змінного струму в постійний за допомогою випрямлячів, що працюють за схемою двонапівперіодного випрямлення з нульовим виводом або за мостовою схемою. Тягові двигуни живляться пульсуючим постійним струмом, частково згладженим індуктивністю реактора в колі постійного струму.

Крива струму контактної мережі через наявність випрямлячів на електровозах відрізняється від синусоїди. Вищі гармоніки тягового струму індукуються в лінію ДПР і спотворюють криву напруги, тим самим знижуючи ЯЕ по несинусоїдності напруги. При цьому величина опору взаємної індукції для гармонік, частота яких відрізняється від промислової частоти f , буде залежати від номера гармоніки n :

$$Z_M = -j \cdot n \cdot 2\pi \cdot f \cdot M, \quad (2.4)$$

Таким чином, гармоніки тягового струму з більшим порядковим номером в n разів більше індукуються в лінію ДПР і різко спотворюють у ній синусоїду напруги. При більших струмах КМ якість електроенергії в даних лініях може не відповідати показникам по несинусоїдності напруги.

Слід зазначити, що спотворення синусоїди напруги ДПР може відбуватися при магнітному впливі тягових струмів у нормальному й змушеному режимі роботи системи електропостачання. На відміну від зазначених режимів, в аварійному режимі струм КЗ, що протікає по КМ, синусоїдний і не спотворює криву напруги системи ДПР.

Підводячи підсумок вищевикладеному, позначимо параметри магнітного впливу КМ на систему напруг у ДПР. Негативний магнітний вплив КМ характеризується:

– більше високим рівнем індукованої КМ поздовжньої ЕРС у порівнянні з іншими лініями;

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						31
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- несиметрією системи напруги у фазах лінії ДПР;
- додатковими падінням і втратами напруги у фазах ДПР, внесеними опором взаємоіндукції між КМ і проводами лінії ДПР;
- несинусоїдністю напруги, внесеної вищими гармоніками тягового струму.

Параметри магнітного впливу КМ обумовлюють зниження показників ЯЕ в точках приєднання споживачів ДПР по несиметрії, відхиленню й несинусоїдність напруги.

2.2 Електричний вплив напруги контактної мережі на систему ДПР

Електричний вплив системи електропостачання змінного струму на лінію ДПР проявляється в наведенні в ній потенціалу стосовно землі. Цей потенціал викликаний дією електричного поля, що створюється напругою контактної мережі [6]. Якщо в контактній мережі є напруга, а струм у ній не протікає через відсутність навантаження, то можна розглядати тільки електричний вплив.

Особливістю електричного впливу контактної мережі на систему напруг ДПР є та обставина, що фаза однієї з лінійних напруг ДПР збігається з фазою напруги КМ. Тоді система проводів контактної підвіски й одного із проводів ДПР являють собою розщеплену фазу.

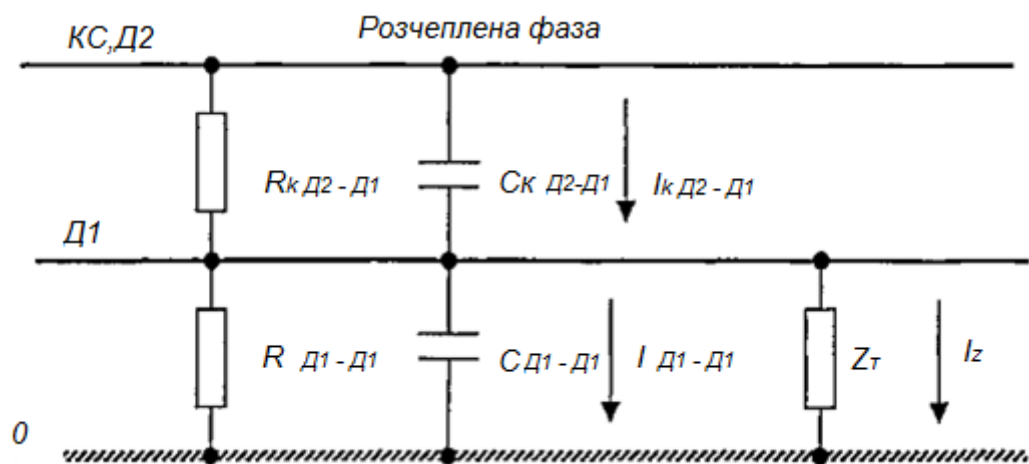


Рисунок 2.1 – Схема ємнісного зв'язку між системою проводів КМ, Д2 і проводом Д1 лінії ДПР

Таким чином, потенціал цього проводу системи ДПР стосовно землі під електричним впливом контактної мережі не зміниться. А зміна потенціалу під дією електричного поля контактної мережі буде мати місце в проводі ДПР, фаза якого не збігається з фазою напруги контактної мережі.

Для визначення напруги, індукованої в проводі Д1, скористаємося схемою електричного зв'язку між системою проводів КМ і Д2 і проводом Д1, показаної на рис 2.1. Якби провід Д1 був повністю ізольований від землі, то на ньому наводився б значний потенціал. Однак варто врахувати, що провід Д1 у всіх режимах роботи лінії ДПР має з'єднання із землею через опір двох фаз високовольтної обмотки трифазних трансформаторів КТП.

Зневажаючи активними складовими повних провідностей витoku ($R_{к.д 2-д1} = \infty$ і $K_{д 1-д1} = \infty$) і втратою напруги в проводі Д1, що викликаний ємнісним струмом, запишемо рівняння для струмів, що протікають у системі проводів :

$$\begin{cases} I_{к.д2-д1} = \frac{U_{к}}{\frac{1}{1/z_T \ell} + j\omega C_{д1-д1} \ell} + \frac{1}{j\omega C_{к.д2-д1} \ell}} \\ I_Z = \frac{U_{д1}}{z_T \ell}, \quad I_{д1-д1} = \frac{U_{д1}}{1/j\omega C_{д1-д1} \ell} \end{cases}, \quad (2.5)$$

де $U_{к}, U_{д1}$ - напруги КМ і індукована напруга проводу Д1 відповідно;

z_T - опір двох фаз високої обмотки трансформаторів КТП;

$C_{д1-д1}$ - ємність проводу Д1 відносно землі;

$C_{к.д2-д1} = C_{к.-д1} + C_{д2-д1}$ - взаємна ємність між КМ, проводом Д2 і проводом Д1 лінії ДПР.

Крім того, ці струми пов'язані співвідношенням:

$$I_{к.д2-д1} = I_{д1-д1} + I_Z, \quad (2.6)$$

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						33
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Спільне рішення дає формулу для визначення індукованої напруги в проводі Д1:

$$U_{Д1} = U_K \frac{j\omega C_{К,Д2-Д1} \ell}{1/Z_T^2 + j\omega \ell (C_{К,Д2-Д1} + C_{Д1-Д1})}, \quad (2.7)$$

Модуль індукованої напруги системою проводів КМ, Д2 у проводі Д1 ДПР буде дорівнює:

$$|U_{Д1}| = U_K \frac{j\omega C_{К,Д2-Д1} \ell}{\sqrt{1/Z_T^2 + \omega^2 \ell^2 (C_{К,Д2-Д1} + C_{Д1-Д1})^2}}, \quad (2.8)$$

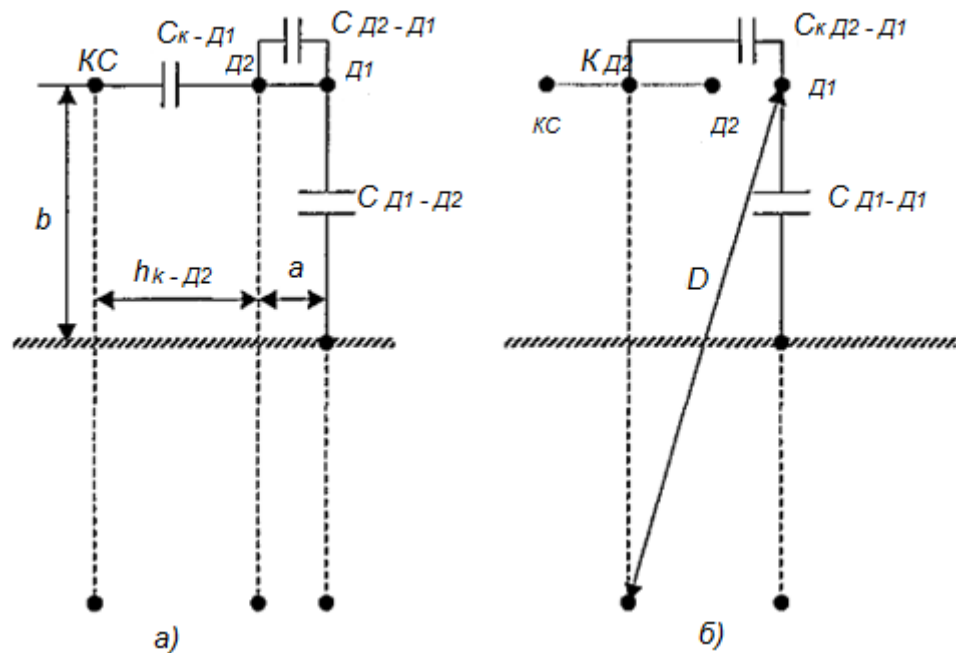


Рисунок 2.2 – До розрахунку ємнісного зв'язку між системою КМ, Д2 і проводом Д1 ДПР

Тоді завдання по визначенню індукованої напруги в проводі Д1 від електричного впливу проводів КМ і Д2 зводиться до визначення часткових

ємностей, і опору двох фаз високовольтної обмотки трансформаторів КТП ДПР, розташованих на ділянці зближення.

Для розташування проводів, згідно рис 2.2, а, з урахуванням збігу напруги проводу Д2 з напругою КМ, розрахункова схема визначення часткових ємностей електричного впливу буде відповідати рис 2.2, а.

Відомо, що висота підвісу проводів системи ДПР щодо землі повинна бути не менш 7 м. Для спрощення розрахунків можна приймати висоту підвісу КМ і проводів ДПР однаковими.

Тоді систему проводів, що складається із проводів контактної підвіски і проводу Д2 ДПР, не допускаючи істотної похибки можна замінити проводом КД2, розташованим на 1/2 відстані між цими проводами (рис. 2.2, б) з радіусом:

$$r_{KD2} = \sqrt[3]{r_{ЭК} r_{D2} h_{KD2}}, \quad (2.9)$$

де $r_{ЭК}$ – радіус еквівалентного контактного проводу;

r_{D2} – радіус проводу ДПР;

h_{KD2} – відстань між КМ і проводу ДПР.

Виходячи із прийнятих раніше допущень, часткові взаємні й власні ємності даної системи проводів на 1 км довжини зближення визначаються по формулах :

$$\begin{cases} C_{KD2-D1} = \frac{\alpha_{KD2-D1}}{\alpha_{KD2-KD2} \cdot \alpha_{D1-D1}} \\ C_{D1-D1} = \frac{\alpha_{KD2-KD2} - \alpha_{KD2-D1}}{\alpha_{KD2-KD2} \cdot \alpha_{D1-D1}} \end{cases} \quad (2.10)$$

де $\alpha_{KD2-D1} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D}{0,5h_{KD2}+a}$ – взаємний потенційний коефіцієнт між проводами;

$\alpha_{KD2-KD2} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2b}{r_{KD2}}$ – власний потенційний коефіцієнт проводу Д2;

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						35
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\alpha_{Д1-Д1} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2b}{r_{Д1}} - \text{власний потенційний коефіцієнт проводу Д1.}$$

Для зазначених геометричних параметрів: $C_{КД2-Д1} = 1,44$ нФ/км,

$$C_{Д1-Д1} = 5,37 \text{ нФ/км.}$$

Оцінімо величину індукованої напруги ділянки довжиною 40 км, підставивши знайдені величини:

$$U_{Д1} = U_K \frac{1,82 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{1/Z_T^2 + 7,33 \cdot 10^{-9}}}, \quad (2.11)$$

Якби провід Д1 був ізольований від землі, то перший доданок у знаменнику прагнув до нуля й на проводі наводився потенціал стосовно землі завбільшки 5,8 кВ. Однак даний провід має з'єднання з рейками (землею) через дві фази зірки високовольтної обмотки трансформаторів КТП. Оцінімо величину даного опору. Величина опору двох фаз первинної обмотки трансформаторів КТП лини ДПР залежно від навантаження може змінюватися в широких межах. Так, максимальне його значення в кілька десятків кОм має місце в режимі холостого ходу трансформатора, а мінімальне – у режимі короткого замикання – становить частки Ом. Як правило, у нормальному режимі роботи лінії ДПР цей опір нижче значення 10^3 Ом. При цьому величина індукованої напруги не перевищує 0,37 кВ, а потенціал у проводі Д1, наведений електричним полем системи проводів КМ і Д2 ДПР, не робить істотного впливу на режими роботи системи ДПР.

Таким чином, при розгляді питань електромагнітного впливу контактної мережі на якість напруги системи ДПР його електричної складової можна зневажити.

Однак слід зазначити, що наявність розподіленої ємності КМ в одному із проводів ДПР і індуктивного навантаження трансформаторів споживачів за певних умов можуть привести до виникнення резонансних режимів, які можуть вивести апаратуру споживачів з ладу .

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						36
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

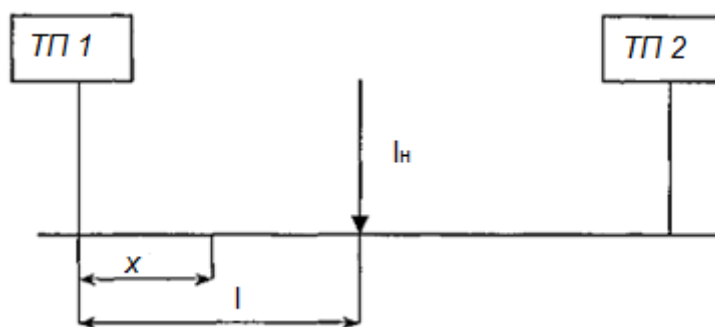
2.3 Гальванічний вплив тягових струмів на лінію ДПР

На електрифікованих залізницях рейкове коло є зворотним проводом для протікання тягових струмів. Оскільки рейки не ізолювані від землі, а з'єднані з нею через шпали [7], баластову призму й земляне полотно, то частина тягового струму відгалужується в землю й протікає по ній як по паралельно приєднаному до рейок провідникові. При цьому внаслідок гальванічного впливу підвищується потенціал рейок і прилягаючої частини землі щодо вилученої маси землі, що має нульовий потенціал.

Зміна потенціалу рейок або третьої фази лінії ДПР при протіканні тягових струмів приводить до виникнення в ній додаткової несиметрії напруги. А при проходженні поїзда в місці підключення КТП ДПР підвищення потенціалу рейок, викликане тяговим струмом, особливо негативно позначається на параметрах напруги лінії ДПР.

Величина потенціалу рейок, обумовленого протіканням тягових струмів, залежить від багатьох факторів. До них ставляться: струм контактної мережі, опір рейок, перехідний опір « рейки – земля», провідність землі.

Для оцінки величини потенціалу рейок при протіканні тягового струму і його впливу на якість напруги лінії ДПР обмежимося розглядом схеми одноколійної ділянки, у якій у середині фідерної зони перебуває одне тягове навантаження (рис. 2.3). Проаналізуємо вплив цього навантаження на параметри напруги в споживача ДПР, розташованим тут же, при різній величині струму навантаження.



					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						37
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Рисунок 2.3 – Розрахункова схема ділянки

Потенціал рейок на відстані x від тягової підстанції без обліку впливу взаємної індукції контурів визначається з виразу:

$$\Psi_X = U_K \frac{\operatorname{sh}k\left(x - \frac{\ell}{2}\right)}{\operatorname{ch}\frac{k\ell}{2}}, \quad (2.12)$$

$$\text{де } m = \sqrt{Z_P Z_{II}}, \quad k = \sqrt{\frac{Z_P}{Z_{II}}},$$

Z_P – повний опір рейкового кола;

Z_{II} – перехідний опір.

У рамках дослідження становить інтерес визначення максимальних значень потенціалу рейок у місці підключення КТП. Такі значення мають місце в пусковому режимі поїзда й при найбільшому струмі годинного режиму поїзда. Пусковий струм електровоза ВЛ 85 становить 604 А. При наявності в складі поїзда двох електровозів (секцій) даної марки пусковий струм збільшується у два рази й становить 1208 А. У розрахунках обмежимося значеннями пускового струму навантаженням 1200 і 600 А, а величини найбільшого струму годинного режиму поїзда приймемо рівними 300 і 200 А.

Визначення опору рейкового кола при протіканні по ній змінного струму пов'язане з деякими труднощами. Крім явища поверхневого ефекту, варто враховувати й обставину, що магнітна проникність матеріалів рейок залежить від значення, що протікає по них, струму. При зазначених струмах активний опір r_{pa} однієї нитки рейкового кола рейок марки Р65 з урахуванням опору стиків приймають значення 0,284; 0,314; 0,25; 0,2 Ом/км.

Еквівалентний опір рейок одноколійної ділянки визначається за формулою:

$$Z_{ЭР1} = 0,5r_{pa} + 0,05 + j0,144 \left(1,97 + 2,6r_{pa} - \ln \sqrt{R_p a_{p12} \sqrt{\gamma_3}} \right), \quad (2.13)$$

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						38
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де R_p – радіус рейки;

a_{p12} – відстань між осями першої й другої рейок;

γ_3 – провідність землі.

Для провідності землі 10^{-2} См/км повний опір рейок одноколійної ділянки для зазначених струмів відповідно рівні 0,27; 0,289; 0,249 і 0,218 Ом/км.

Величина перехідного опору залежить від декількох факторів і може змінюватися в широких межах. До них можна віднести: матеріал і ступінь забруднення баласту і шпал, просочення шпал антисептиками, вологість. Однак при сухому баласті ці значення можуть збільшуватися в 2...2,5 разів, а при промерзлому в 10...100 разів, залежно від ступеня промерзання. Забруднення поверхні баласту й застосування шпал, просочених металевими солями, знижує перехідний опір до 0,2...0,15 Ом·км. Нормою мінімального опору баласту для рейкових кіл при автоблокуванні прийнята величина 1 Ом·км. Ці дані ставляться при ізоляції однієї рейки від іншої. Якщо тут перехідні опори від першої рейки [9] до баласту і від баласту до другої рейки як би з'єднані послідовно, то при витoku тягового струму вони з'єднані паралельно. Тоді перехідний опір від обох рейок до баласту буде нижче наведених в 2...4 рази.

Графік залежності потенціалу рейок у місці підключення КТП ДПР, розрахований за виразом за умови $\ell = x = 20$ км, від струму поїзда, що проходить, представлені на рис 2.4. Дані графіка показують, що при пускових струмах величина потенціалу рейок перевищує значення, що відповідають 1...2% номінальної напруги лінії ДПР.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						39
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

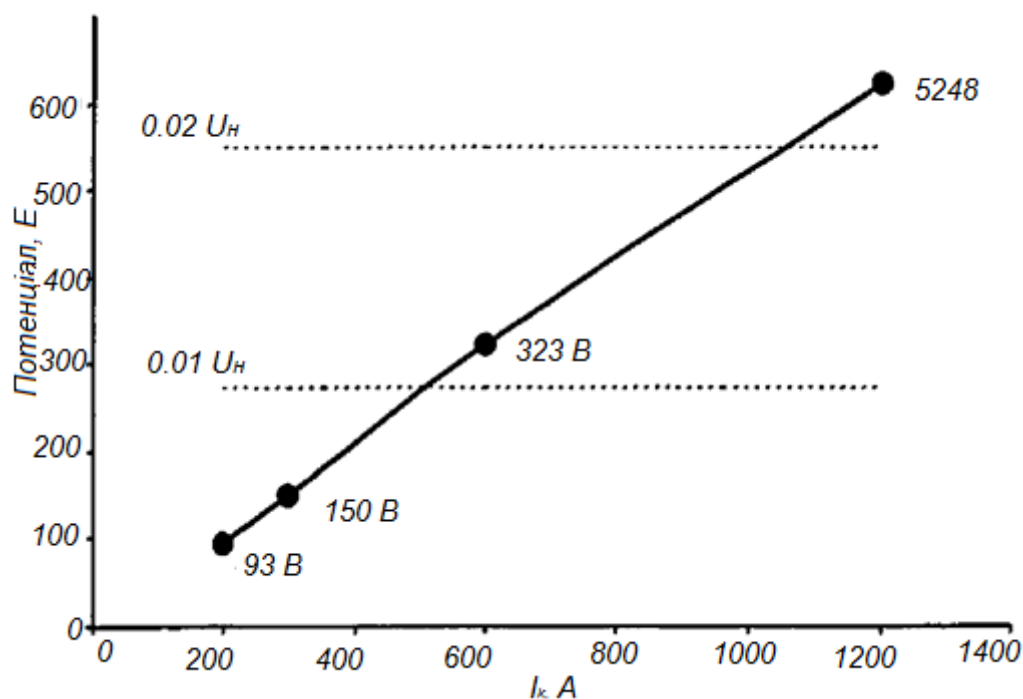


Рисунок 2.4 – Графік залежності потенціала рейок від струму поїзда

Такі величини потенціалу рейок вносять додаткову несиметрію в систему напруг лінії ДПР. При цьому коефіцієнт несиметрії напруги [8] в лінії ДПР, розрахований раніше, внаслідок гальванічного впливу тягових струмів значно зростає, що приводить до додаткового погіршення ЯЕ.

3 МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЛІНІЯХ «ДВА ПРОВОДИ-РЕЙКА»

3.1 Методика вимірювання показників якості

Метою експерименту була кількісна оцінка ефекту від переведення лінії ДПР на двостороннє живлення. Вимірювання проведено на Одеській залізниці, де є дві ділянки між тяговими підстанціями, які можливо перевести на двостороннє живлення. Споживач, за нормальної схеми електропостачання, отримує напругу від лінії ДПР, що підключена до шин тягової підстанції Чубівка (ЕЧЕ-25). Резервне живлення споживачів забезпечує підстанція Слобідка (ЕЧЕ-26). Схема вимірювання, реалізована під час вимірювання, представлена на рис. 3.1.

Під час експерименту споживач отримував живлення від двох підстанцій одночасно та окремо від кожної підстанції. Кожен режим живлення тривав протягом трьох годин, загальна тривалість експерименту становила 9 годин. Перший режим відповідав нормальній схемі живлення. Відстань між точкою вимірювання

та тяговою підстанцією Чубівка уздовж лінії складала близько 50 км. У наступному режимі реалізовано схему двостороннього живлення споживача. Після переведення споживача на живлення від підстанції Слобідка, відстань до тягової підстанції склала 3 км.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						41
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

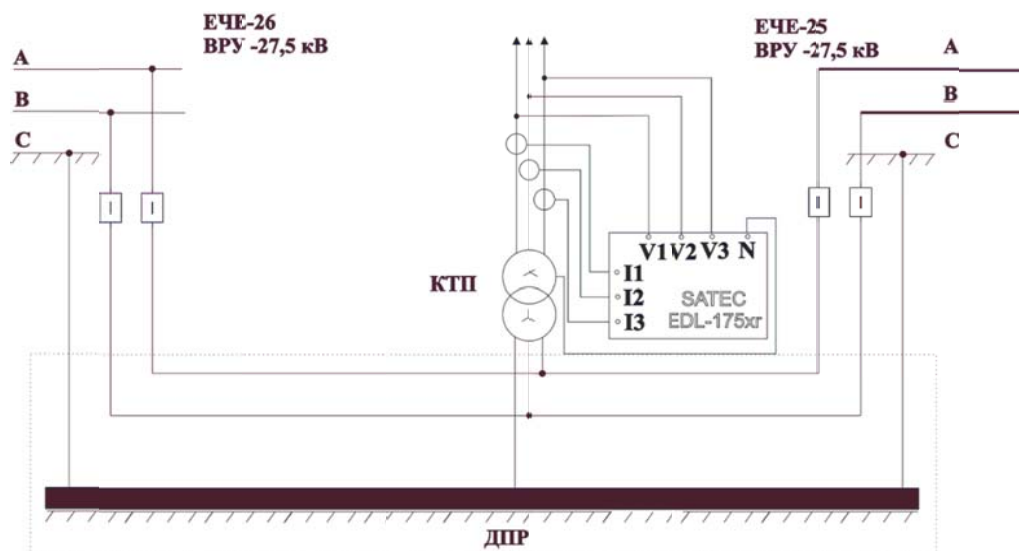


Рисунок 3.1 – Схема проведення вимірювань показників пості якості на ділянці між підстанціями Чубівка – Слобідка

Під час експерименту споживач отримував живлення від двох підстанцій одночасно та окремо від кожної підстанції. Кожен режим живлення тривав протягом трьох годин. Загальна тривалість експерименту становила 9 годин. Перший режим відповідав нормальній схемі живлення. Вимірювання розпочались о шостій ранку та тривали до дев'ятої годин. Відстань між точкою вимірювання та тяговою підстанцією Чубівка вздовж лінії близько 50 км. У наступному режимі реалізовано схему двостороннього живлення споживача. Після дванадцятої години споживача перевели на живлення від підстанції Слобідка, відстань до якої становила 3 км.

Для вимірювання та реєстрації використано портативний аналізатор якості електричної енергії SATEC EDL-175xr зображений на рис. 3.3, а. Основні метрологічні характеристики та функції пристрою приведені у табл. 3.1.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						42
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.2 – Портативний аналізатор якості електричної енергії SATEC EDL-175xr

Пристрій, оснащений чотирма вимірювальними каналами призначеними для фіксації значень напруги та трьома – для фіксації значень струму, реалізує схему вимірювань методом трьох ватметрів для трифазних чотирипровідних мереж та двох ватметрів для трипровідних мереж.

Вимірювання струму під час експерименту на КТП здійснювалось через гнучкі роз'ємні кліщі типу LEM-Flex, які представляють собою пояс Роговського. Вимірювана напруга у мережі 0,38 кВ КТП ДПР подавалась на пристрій без пониження. Вимірювання на тягових підстанціях проводяться у вторинних колах трансформаторів напруги на шинах 27,5 кВ та струму фідерів лінії ДПР.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						43
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.1 Характеристики SATEC EDL-175xr

Метрологічні характеристики	
Діапазон вимірювання струмів	30-3000 А
Максимальна вимірювальна напруга	660 V
Вимірювані величини	
Діюче значення струму та напруги	Струм нейтралі
Фазні значення активної, реактивної потужностей	Загальна активна, реактивна потужності
Коефіцієнт потужності для кожної фази	Загальний коефіцієнт потужності
Частота	Несиметрія напруги та струму
Значення гармонік струму та напруги	Реєстрація максимальних значень струму та напруги
Споживана електроенергія для кожної фази	Загальна споживана електроенергія

Обробка та аналіз даних виконувався за допомогою програми PAS (Power Analysis Software), розробленої для аналізатора. Вимірювання проводилось за нормальної схеми електропостачання: без втручання у робочу схему живлення споживачів ДПР. Інтервал реєстрації діючих значень параметрів – 1с, інтервал осцилографування значень струму та напруги складав 20 с.

Варіації параметрів режиму систем електропостачання знаходяться у стохастичній залежності від впливаючих на неї факторів. Результатом їх сукупної дії є різні за знаком, амплітудою та тривалістю збурення, що призводять до зміни параметрів системи у часі. Внаслідок цього результати окремих досліджень можуть суттєво відрізнятись один від одного. Для виявлення закономірностей у процесах, які досліджуються, методика проведення експериментальних вимірювань повинна

нівелювати випадковість у зміні параметрів режиму. У контексті питання електромагнітної сумісності, вимоги до розрахунку показників якості електроенергії та тривалості вимірювань формалізовані у діючих в Україні міждержавних стандартах.

В Україні з 2014 року діє ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення» [10], гармонізований із європейським стандартом EN 50160:2010. У той же час, із прийняттям [10], не втратив чинність ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [11], на який продовжують посилатись інструкції та правила, прийняті до 2014 року [12, 13, 14], а також чинні з 2017 р. [15]. Кодекс систем розподілу [16, п. 11.4.6] визначає, що параметри якості електричної енергії в точках приєднання споживачів у нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам, визначеним у [10], тобто згідно з законодавством установлені в стандарті характеристики напруги не є рівнями електромагнітної сумісності електричного обладнання, а є показниками для оцінки якості надання послуг із електропостачання. У такому разі виконання вимог до якості електричної енергії [11] продовжує гарантувати надійну та енергоефективну роботу електротехнічного обладнання.

Зауважимо, що при імплементації міжнародного стандарту у [10] змінено термінологію, яка використовувалась у [11], а саме термін «несиметрія напруги» змінено на «небаланс напруги», «коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги» (далі коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги) – на «сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень» (СКГС) та замість «відхилення напруги» використовується «змінення напруги». Також у тексті даної дисертації «коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності» називається «коефіцієнт зворотної послідовності напруги».

Вимоги [10] та [11] до значення відхилення напруги, коефіцієнта несинусоїдності кривої та коефіцієнта зворотної послідовності напруги приведені у

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						45
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

табл. 3.2 та 3.3. Для кожного показника у [11] розрізняється нормально та максимально допустимі значення. Відповідно, електроенергія вважається неякісною за одним із встановлених стандартом показників, якщо під час вимірювання зафіксовано факт перевищення максимального або нормально допустимого значення з імовірністю вище 5 %. У [10] відхилення напруги оцінюють за максимальним та нормальним значенням; СКГС – за максимальним; коефіцієнт зворотної послідовності – за нормальним значенням.

Аналізу розбіжностей, які має ДСТУ EN 50160:2014 у відношенні до ГОСТ 13109-97, присвячені роботи [17, 18, 19]. Загалом їх автори обмежились співставленням нормативних значень відповідних показників якості електроенергії. Проте, менше уваги приділено вимогам до обробки результатів вимірювання. Зокрема, розмір інтервалу усереднення вимірних значень напруги, який у ГОСТ 13109-97 складає 3 або 60 с, у залежності від розрахованого показника, а у ДСТУ EN 50160:2014 – 10 хв, може мати істотний вплив на результат оцінки якості електроенергії у системі.

За обставин, коли дослідження якості електричної енергії, направлене на вставлення факту перевищення рівнів електромагнітної сумісності, не може оминати сторону комерційних відносин між споживачем та власником мережі, аналіз якості електроенергії доцільно проводити за методикою прописаною у [11] та [10] одночасно.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						46
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2 Порівняльна таблиця значень показників якості електроенергії за ГОСТ 13109-97 та ДСТУ EN 50160:2014

Показник	ГОСТ 13109-97		ДСТУ EN 50160:2014	
	Нормальне	Максимальне	Нормальне	Максимальне
усталене відхилення напруги	$U_N \pm 5 \%$	$U_N \pm 10 \%$	$U_N \pm 10 \%$ до 35 кВ	$U_N + 10(-15)\%$ до 1 кВ $U_N \pm 15 \%$ від 1 до 35 кВ
Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги	За табл. 3.3	За табл. 3.3	—	8 %
коефіцієнт зворотної послідовності напруги	2,0 %	4,0 %	2,0 %	—

Таблиця 3.3 Значення коефіцієнту несинусоїдності кривої напруги приведені у ГОСТ 13109-97

Номінальна напруга, кВ	Нормально допустимі				Гранично допустимі			
	0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги, %	8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Для розрахунку показників якості використані наступні формули:

$$\delta U = \frac{U - U_H}{U_H} \cdot 100, \quad (3.1)$$

$$K_U = CKTC = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100, \quad (3.3)$$

де δU – відхилення напруги, В;

K_U – коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги або сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКТС);

K_{2U} - коефіцієнт зворотної послідовності напруги;

U – усереднене середньоквадратичне (амплітудне) значення міжфазної напруги, В;

U_H – номінальне значення напруги, В;

$U_{(n)}$ – усереднене середньоквадратичне (амплітудне) значення n-ї гармоніки напруги, В;

$U_{(1)}$ – усереднене середньоквадратичне (амплітудне) значення напруги основної частоти;

$U_{1(1)}, U_{2(1)}$ – відповідно, напруги прямої та зворотної послідовності основної частоти, В;

n – порядок гармоніки напруги.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						48
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3.2 Результати вимірювання показників якості у споживача на ділянці залізниці між підстанціями Чубівка – Слобідка

Статичні функції розраховані для кожного режиму живлення споживача представлені на рис. 3.3 – 3.12. Функції щільності імовірності зображені у вигляді полігону відносних частот, де маркерами позначені точки з абсцисами рівними серединам інтервалів групування, а ординати – значення відносних частот.

Розраховані усереднені значення відхилення напруги за [20] змінюються у межах від +6%...+11% відносно номінального рівня напруги у мережі споживача (380 В), що свідчить про порушення вимог стандарту та порушення вимог стандарту до нормально допустимих значень, які встановлені [20] на рівні 5%. Відхилення напруги з вимогами [21] у межах допустимих значень: не перевищує 10%.

За результатами розрахунку із використанням різних інтервалів усереднення помітного впливу на відхилення напруги від зміни режиму електропостачання не зафіксовано.

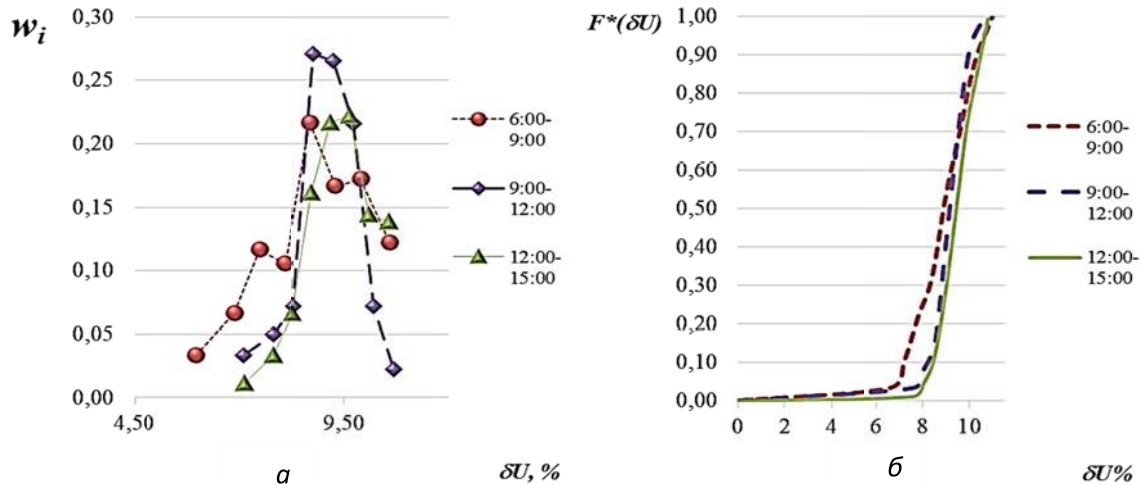


Рисунок 3.3 – Поліг н відносних частот (а) та функція розподілу (б) значень відхилення напруги за ГОСТ 13109-97

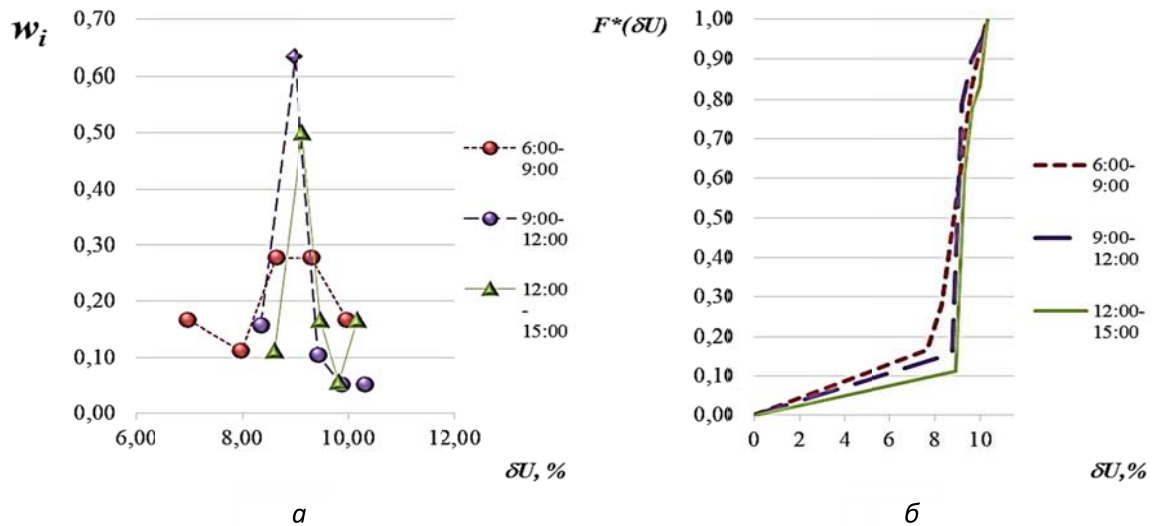


Рисунок 3.4 – Поліг н відносних частот (а) та функція розподілу (б) значень відхилення напруги за ДСТУ EN 50160:2014

Спотворення зазнала симетрія векторів напруги у колі споживача, що визначається у перевищенні коефіцієнтом зворотної послідовності напруги нормально допустимого значення у всіх режимах роботи з імовірністю понад встановленої у [20], аналогічний результат отримано керуючись [21]. Так ймовірність появи неякісної напруги у першому, другому та третьому режимі живлення споживача складає 61%, 6%, 20% за ГОСТ 13109-97 та 61%, 8%, 25% за ДСТУ EN 50160:2014 (рис.3.5 та 3.6), відповідно.

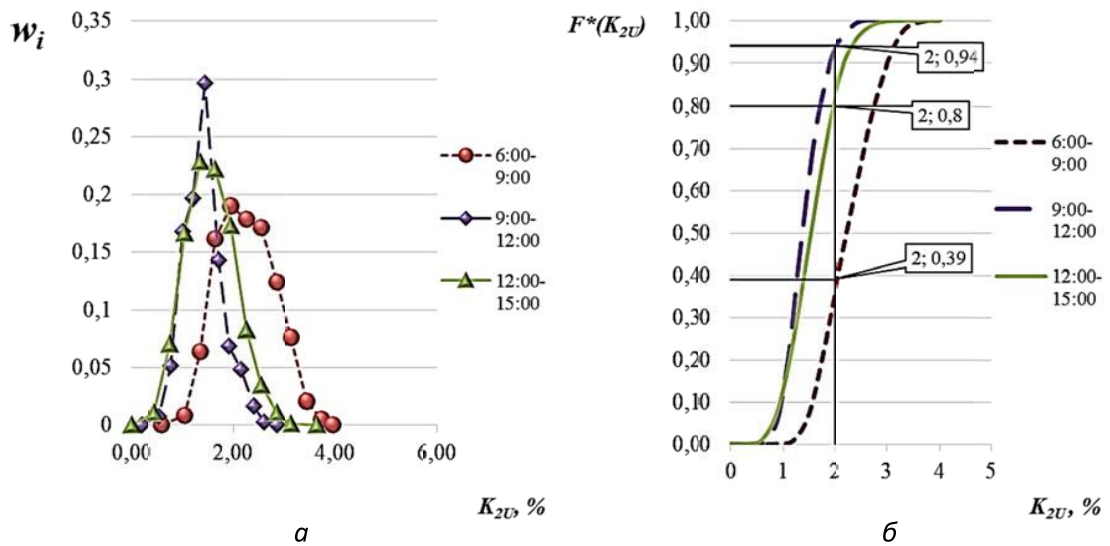


Рисунок 3.5 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень коефіцієнтів зворотної послідовності напруги за ГОСТ 13109-

97

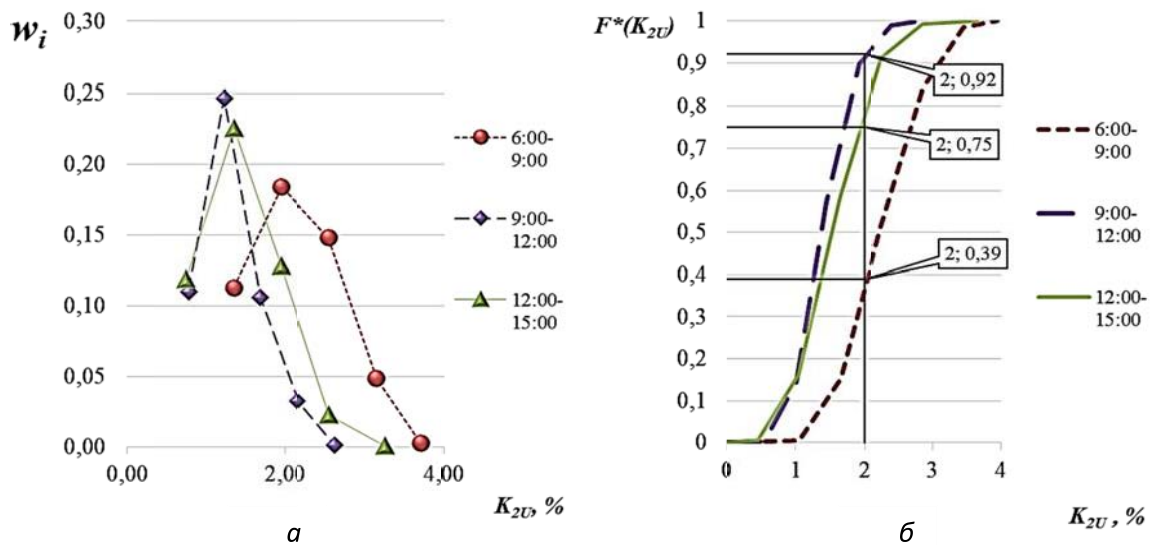


Рисунок 3.6 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень коефіцієнтів зворотної послідовності напруги за ДСТУ EN 50160:2014

За показниками якості, що використані для оцінки форми кривої напруги,

порушення вимог [20] та [21] не зафіксовано.

Встановлено, що застосування більшого інтервалу усереднення при обробці результатів вимірювання призвело до зменшення діапазону зміни значень $СКГС$ на 2% та збільшилась ймовірність перевищення нормально допустимого значення коефіцієнту несиметрії напруги.

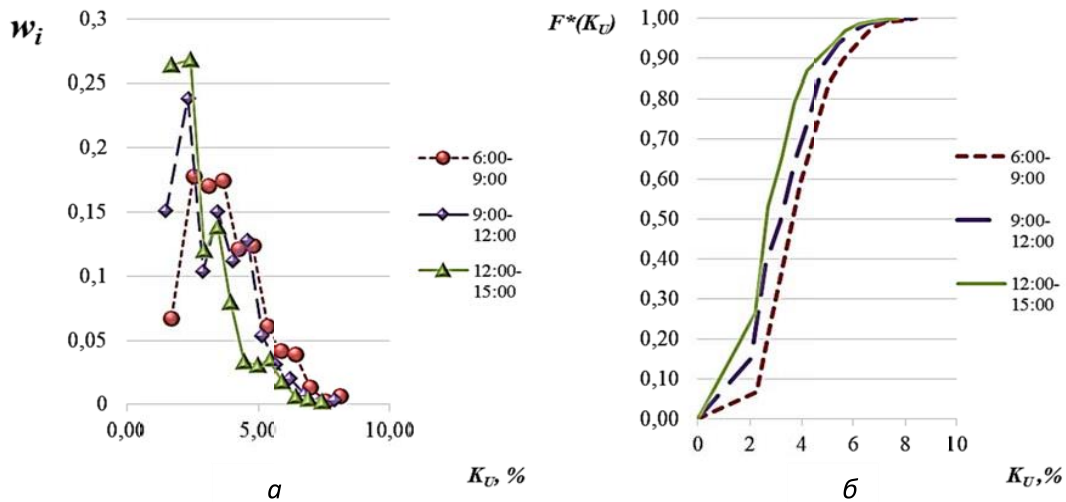


Рисунок 3.7 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень коефіцієнту несинусоїдності кривої напруги між фазами А та В за ГОСТ 13109-97

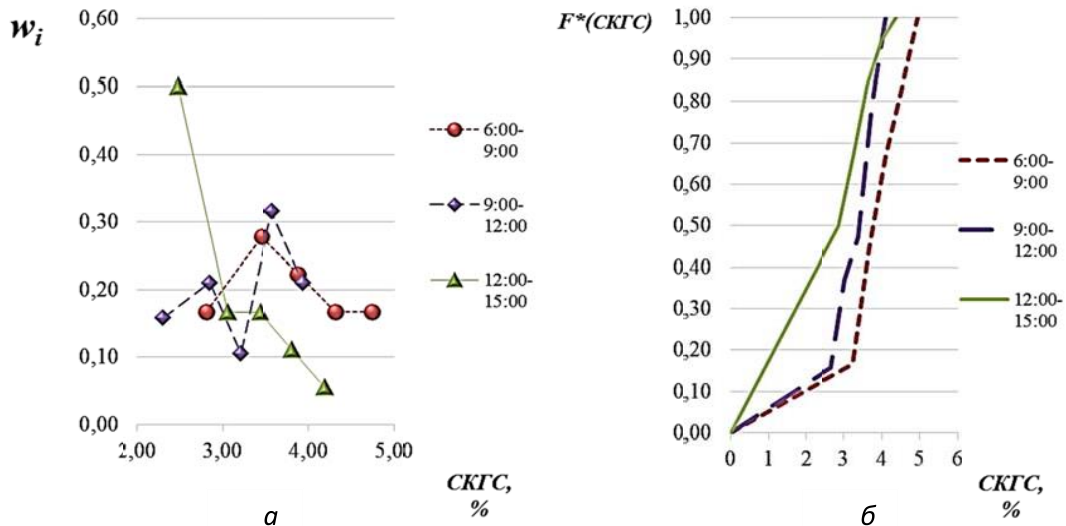


Рисунок 3.8 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень сумарного коефіцієнту гармонійних спотворень напруги між

фазами *A* та *B* за ДСТУ EN 50160:2014

Під час живлення споживача від підстанції Чубівка можливо вважати нормальним розподіл для відхилення напруги і *СКГС* у напрузі між фазами *A – B* та *C-A*. Під час двостороннього живлення споживача *СКГС* для трьох міжфазних напруг достовірніше описує нормальний розподіл. Небаланс напруг у всіх трьох режимах живлення описується логнормальним законом ($p - value = 0.06$).

Розподіл всіх інших показників підкоряється логнормальному закону, крім відхилення напруги у другому і третьому режимі та *СКГС* для напруги між фазами *C-A* у другому режимі, для яких підібрати аналітичну форму закону не вдалося, тому для них далі використовуються непараметричні статистичні методи.

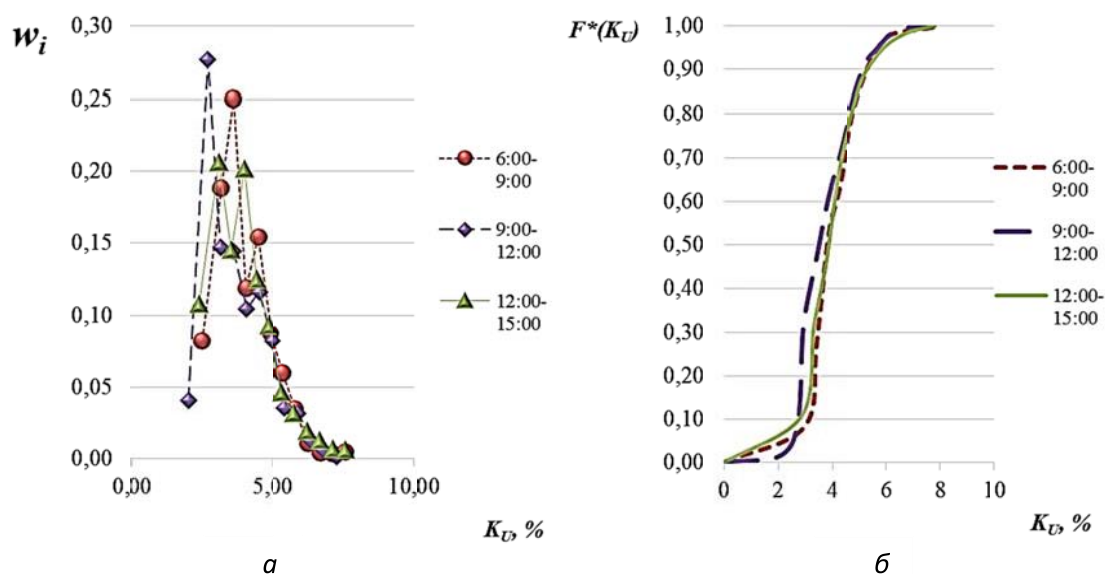


Рисунок 3.9 – Полігон відносних частот (*a*) та функція розподілу (*б*) випадкових значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами *B* та *C* за ГОСТ 13109-97

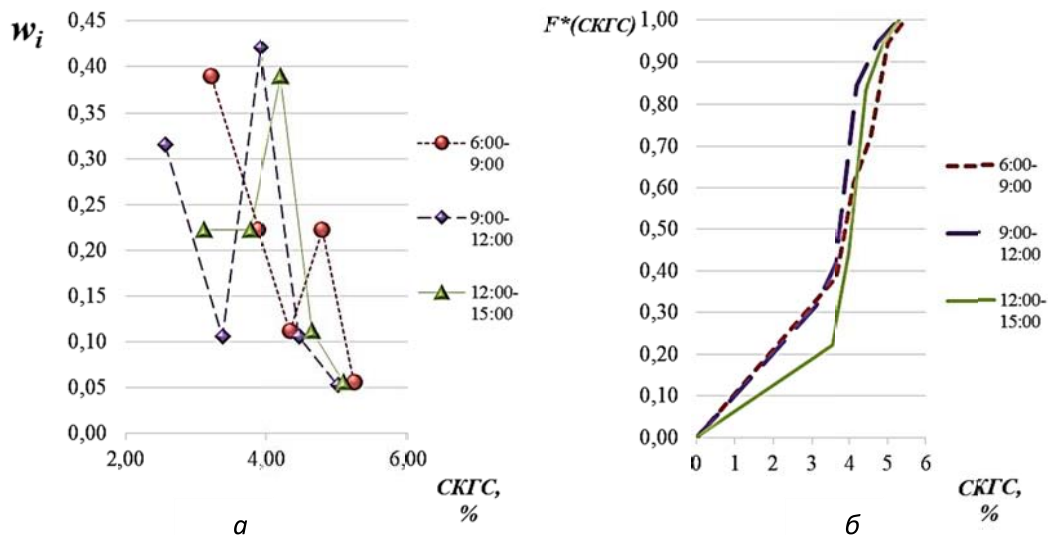


Рисунок 3.10 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень напруги між фазами В та С за ДСТУ EN 50160:2014

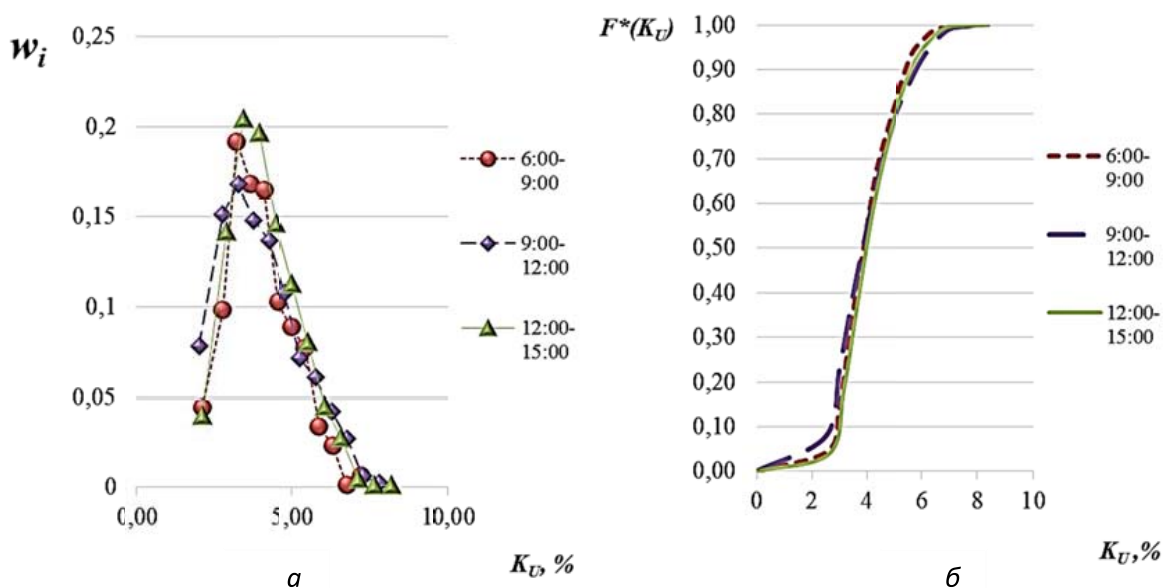


Рисунок 3.11 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень коефіцієнта несинусоїдності кривої напруги між фазами С та А за ГОСТ 13109-97

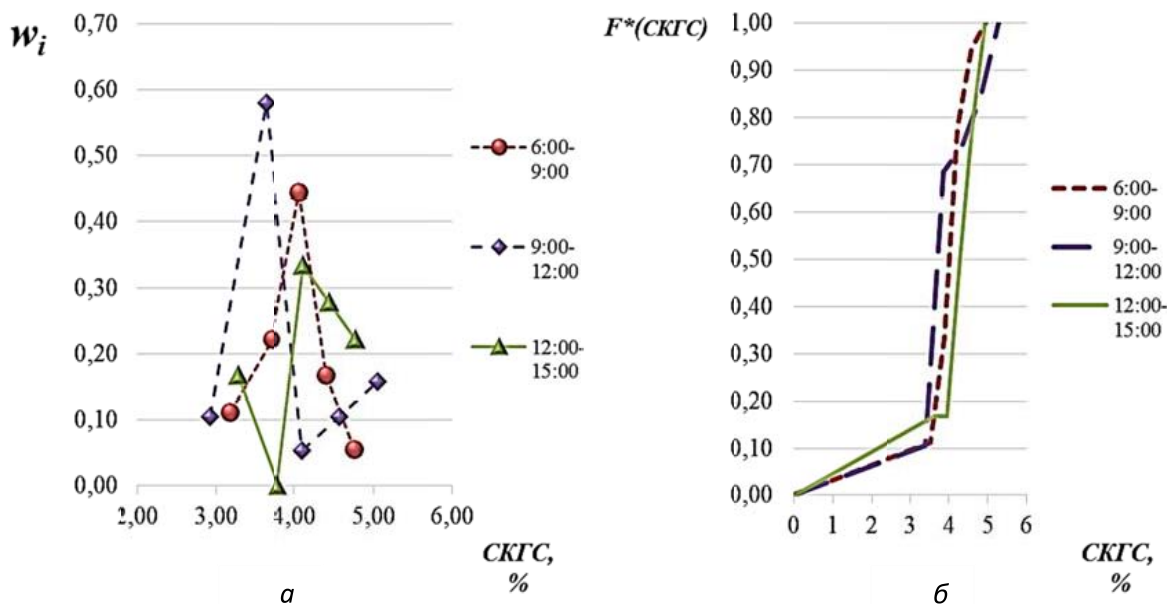


Рисунок 3.12 – Полігон відносних частот (а) та функція розподілу (б) випадкових значень сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень напруги між фазами С та А за ДСТУ EN 50160:2014

Розраховані числові характеристики для режимів живлення споживача зведені у табл. 3.4-3.6. У полях таблиць, через риску дробу, вказані данні, отримані за вимогами двох стандартів: [20] у чисельнику та [21] у знаменнику.

Кількісну оцінку ефекту від переведення на двостороннє живлення споживача отримаємо через порівняння значень мод розподілів показників якості у першому та третьому режимі у відношенні до другого режиму живлення споживача.

Таблиця 3.4 Статистичні характеристики показників якості електроенергії з 6:00 до 9:00

Статистичний параметр	Усталене відхилення напруги	Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги / Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень		
			AB	BC	CA
Середнє, %	8,82 / 8,82	2,25 / 2,25	3,86 / 3,86	4,01 / 4,01	3,99 / 3,99
Стандартна помилка середнього, %	0,08 / 0,24	0,01 / 0,11	0,03 / 0,15	0,02 / 0,15	0,02 / 0,1
Медіана, %	8,81 / 8,95	2,41 / 2,40	3,7 / 3,96	3,80 / 3,8	3,8 / 4,02
Мода, %	8,63 / 9,26	1,95 / 1,92	2,8 / 4,05	3,63 / 3,56	3,31 / 4,3
Стандартне відхилення, %	1,13 / 1,03	0,60 / 0,48	1,26 / 0,65	0,92 / 0,65	1,00 / 0,43
Дисперсія в, %	1,28 / 1,06	0,36 / 0,23	1,59 / 0,43	0,85 / 0,42	0,99 / 0,19
Екссес	-0,72 / -0,81	-0,65 / -0,76	0,16 / -0,9	1,05 / -0,4	-0,17 / 0,56
Асиметрія	-0,32 / -0,42	0,23 / 0,43	0,75 / 0,04	0,96 / 0,74	0,53 / 0,26
Інтервал Групування гістограм, %	4,83 / 3,33	3,00 / 1,57	6,70 / 2,15	5,3 / 2,25	5,3 / 1,77
Мінімум, %	6,13 / 6,98	0,05 / 0,73	1,7 / 2,81	2,5 / 3,21	2,1 / 3,17
Максимум, %	10,96 / 10,31	3,94 / 3,78	8,4 / 4,96	7,8 / 5,46	7,4 / 4,94
Ширина інтервалу достовірності для оцінки середнього, %	0,34 / 1,02	0,006 / 0,041	0,1 / 0,66	0,08 / 0,64	0,08 / 0,42

Таблиця 3.5 Статистичні характеристики показників якості електроенергії з 9:00 до 12:00

Статистичний параметр	Усталене відхилення напруги	Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги / Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень		
			AB	BC	CA
1	2	3	4	5	6
Середнє, %	9,11 / 9,18	1,39 / 1,41	3,34 / 3,03	3,7 / 3,66	4,07 / 3,70
Стандартна помилка середнього, %	0,05 / 0,12	0,01 / 0,11	0,03 / 0,13	0,02 / 0,17	0,03 / 0,15
Медіана, %	9,1/9,09	1,44/1,58	3,2/3,4	3,5/3,78	3,9/3,76
Мода, %	8,76/8,99	1,46/1,23	3,45/2,85	2,69/3,92	3,20/3,65
Стандартне відхилення, %	0,69/0,54	0,63/0,47	1,25/0,57	1,03/0,76	1,21/0,65
Дисперсія, %	0,47/0,29	0,4/0,22	1,56/0,32	1,06/0,57	1,46/0,43
Ексцес	0,5/1,55	-0,35/-0,51	0,07/-1,1	-0,03/-0,34	-0,39/-0,65
Асиметрія	-0,31/1,07	0,25/-0,1	0,73/-0,21	0,79/0,4	0,55/0,5
Інтервал групування гістограм, %	3,84/2,18	3,37/1,67	6,7/1,81	5,5/2,72	6/2,37
Мінімум, %	7,08/8,34	0,06/0,69	1,5/2,3	2/2,56	2/2,91
Максимум, %	10,92/10,52	2,75/2,45	8,2/4,11	7,5/5,28	8/5,28

Продовження таблиці 3.5

Ширина інтервалу достовірності для оцінки середнього, %	0,2 / 0.52	0.01 / 0.03	0.1 / 0.54	0.08 / 0.72	0.1 / 0.62
---	------------	-------------	------------	-------------	------------

Таблиця 3.6 Статистичні характеристики показників якості електроенергії з 12:00 до 15:00

Статистичний параметр	Усталене відхилення напруги	Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги / Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень		
			<i>AB</i>	<i>BC</i>	<i>CA</i>
1	2	3	4	5	6
Середнє, %	9,41 / 9,37	1,62 / 1,55	3,05 / 2,77	3,99 / 3,63	4,14 / 3,76
Стандартна помилка середнього, %	0,06 / 0,12	0,01 / 0,1	0,02 / 0,12	0,02 / 0,15	0,02 / 0,11
Медіана, %	9,46 / 9,21	1,60 / 1,63	2,7 / 2,9	3,9 / 4,04	3,9 / 4,26
Мода, %	9,63 / 9,22	1,64 / 1,57	2,58 / 3,23	3,6 / 3,95	3,7 / 4,35
Стандартне відхилення, %	0,75 / 0,53	0,53 / 0,43	1,1 / 0,51	1,01 / 0,62	1,04 / 0,45
Дисперсія, %	0,56 / 0,28	0,28 / 0,18	1,22 / 0,27	1,02 / 0,38	1,08 / 0,2
Екссес	-0,15 / -0,52	-0,29 / -0,43	1,43 / 0,94	0,89 / -0,38	-0,16 / -0,1
Асиметрія	-0,35 / 0,58	0,26 / 0,21	1,32 / 1,16	0,96 / 0,29	0,57 / 0,37
Інтервал Групування гістограм, %	3,69 / 1,75	3,07 / 1,61	6 / 1,9	5,4 / 2,2	6,3 / 1,66
Мінімум, %	7,1 / 8,6	0,03 / 0,45	1,7 / 2,48	2,4 / 3,11	2,1 / 3,28
Максимум, %	10,79 / 10,35	3,93 / 3,63	7,7 / 4,38	7,8 / 5,3	8,4 / 4,94

Продовження таблиці 3.6

Ширина інтервалу достовірності для оцінки середнього, %	0,22 / 0,52	0,004 / 0,04	0,1 / 0,52	0,08 / 0,62	0,08 / 0,44
---	-------------	--------------	------------	-------------	-------------

Так, у аспекті якості електричної енергії у період із живлення нетягового споживача від двох підстанцій, зафіксовано покращення симетрії напруги: значення моди коефіцієнту несиметрії напруги на 0,49% / 0,69% менше відносно першого режиму та на 0,18% / 0,34% - відносно другого. Ці та інші значення різниць між модами розподілів показників якості представлені у табл. 3.7.

Таблиця 3.7 Порівняння мод показників якості різних режимів живлення споживача

Формула розрахунку	Відхилення напруги	Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Коефіцієнт несинусоїдності кривої напруги / Сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень		
			AB	BC	CA
«перший режим» - «другий режим»	-0,13 / 0,27	0,49 / 0,69	-0,65 / 1,2	0,94 / -0,36	0,11 / 0,65
«третій режим» - «другий режим»	0,87 / 0,23	0,18 / 0,34	-0,87 / 0,38	0,91 / 0,03	0,5 / 0,7

У табл. 3.8 показано відповідність вимірних значень показників якості електроенергії по вимогам [21] та [20]. Відповідно відхилення та небаланс

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

напруги не відповідають вимогам [20], а за [21] порушено симетрію системи векторів напруги.

Таблиця 3.8 Оцінка якості електроенергії у колі споживача

Характеристика напруги	Оцінка (+ / -)	
	ГОСТ 13109-97	ДСТУ EN 50160:2014
відхилення напруги	-	+
небаланс напруги	-	-
несинусоїдність напруги	+	+

Оцінимо ступінь вземозв'язку між небалансами напруги та струму у колі споживача у трьох режимах живлення. Коефіцієнти кореляції Спірмена ρ (табл. 3.9) та діаграми розсіювання K_{2U} від K_{2I} приведені нижче (рис. 3.13-3.15).

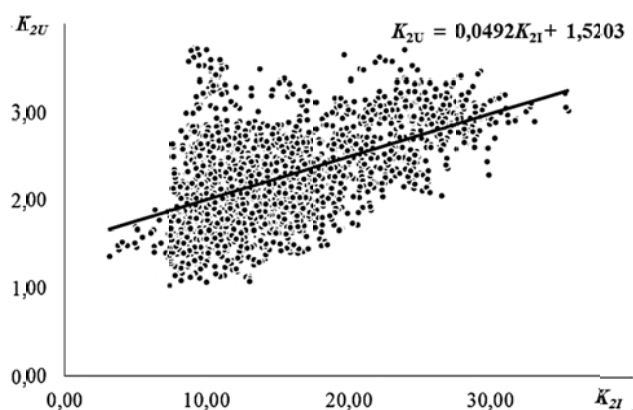


Рисунок 3.13 – Діаграма розсіювання K_{2U} та K_{2I} у режимі живлення від підстанції Чубівка

Таблиця 3.9 Перевірка гіпотези про відсутність статичної значущості кореляції між K_{2U} та K_{21}

Номер режиму	ρ	t -розраховане	t -критичне
1	0,65	40	1,96
2	0,29	14	1,96
3	0,31	15	1,96

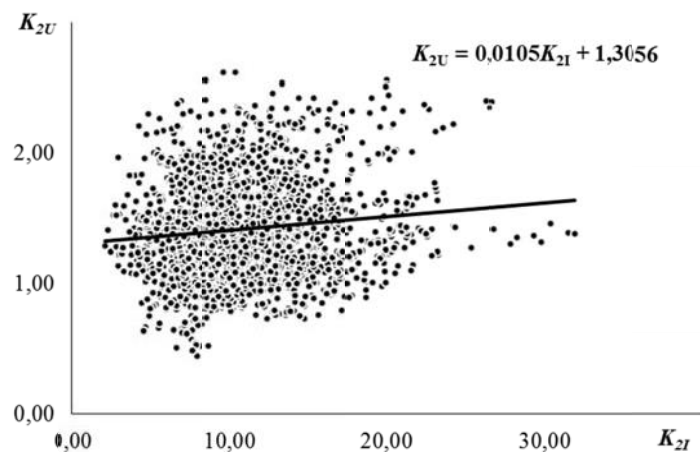


Рисунок 3.14 – Діаграма розсіювання K_{2U} та K_{21} у режимі двостороннього живлення

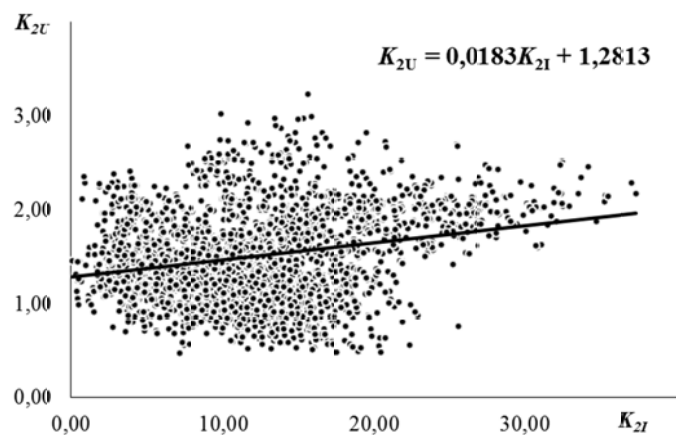


Рисунок 3.15 – Діаграма розсіювання K_{2U} та K_{21} у режимі живлення від підстанції Слобідка

Сильна кореляція виявлена між K_{2U} та K_{21} тільки під час живлення

споживача від підстанції Чубівка, у інших випадках кореляція є слабкою. Оскільки значення K_{21} під час експерименту змінювалось в одному діапазоні, то можливо припустити, що при односторонньому живленні від Слобідки та при двосторонньому живленні від двох підстанцій споживач має менший вплив на небаланс напруги у мережі.

Оскільки, зміна режиму електропостачання найбільше впливає на небаланс напруги у місці приєднання споживача, для статистичного розподілу коефіцієнту несиметрії приведемо підібрані логнормальні закони розподілу (рис. 3.16)

$$f_1(K_{2U}) = 648 \exp \left(- \left[\frac{\ln(K_{2U}) - 0.78}{0.24} \right]^2 / 2 \right) / (\sqrt{2\pi 0.24 K_{2U}}); \quad (3.5)$$

$$f_2(K_{2U}) = 720 \exp \left(- \left[\frac{\ln(K_{2U}) - 0.56}{0.28} \right]^2 / 2 \right) / (\sqrt{2\pi 0.28 K_{2U}}); \quad (3.6)$$

$$f_3(K_{2U}) = 810 \exp \left(- \left[\frac{\ln(K_{2U}) - 0.65}{0.30} \right]^2 / 2 \right) / (\sqrt{2\pi 0.30 K_{2U}}); \quad (3.7)$$

де $f_1(K_{2U})$, $f_2(K_{2U})$, $f_3(K_{2U})$ – щільність ймовірності значень K_{2U} під час режиму живлення від підстанції Чубівка, Чубівка та Слобідка, Слобідка відповідно.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						62
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

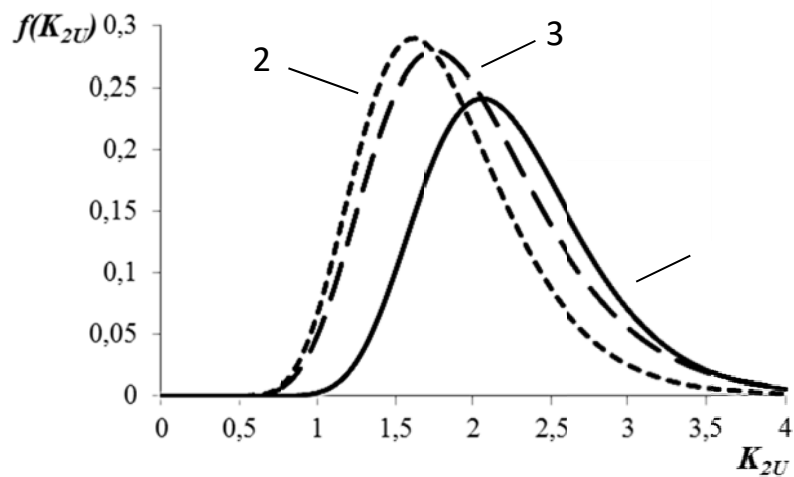


Рисунок 3.16 – Щільність ймовірності значень коефіцієнту зворотної послідовності напруги: 1 – під час живлення від підстанції Чубівка; 2 – під час живлення від підстанцій Чубівка та Слобідка; 3 – під час живлення від підстанції Слобідка

3.3 Оцінка адекватності методу розрахунку на основі експериментальних даних

Результати вимірювань, отримані під час експерименту на ділянці між підстанціями Чубівка – Слобідка, використані для перевірки адекватності математичної моделі. На моделі реалізовано схему електропостачання споживача від підстанцій Чубівка та Слобідка по лінії ДПР із системою зовнішнього електропостачання від районної підстанції Подільська (рис. 3.17).

Як початкові дані для моделювання були використані результати тягових розрахунків, графік руху на ділянці під час вимірювань, результати вимірювання навантаження, параметри системи тягового і зовнішнього електропостачання, рівні напруги у системі зовнішнього електропостачання.

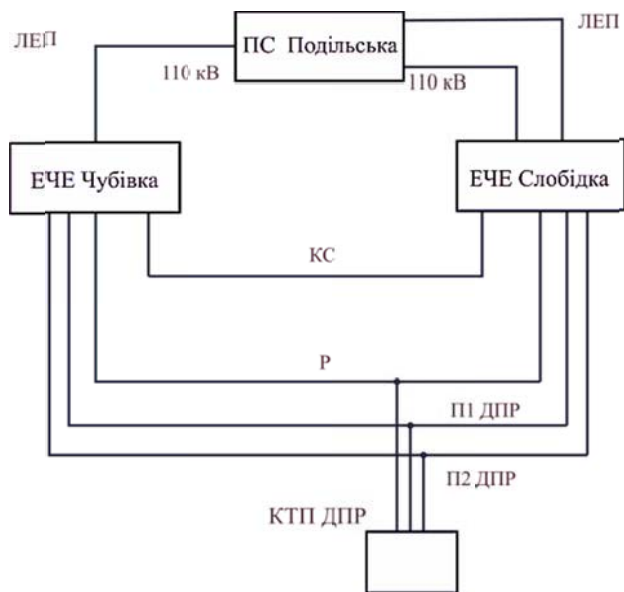


Рисунок 3.17 – Система електропостачання КТП ДПР

З використанням моделі виконано розрахунок коефіцієнту зворотної послідовності напруги. Отримані результати розрахунків порівнюємо з результатами експериментальних досліджень

Характер зміни та приблизний рівень значень коефіцієнту K_{2U} , отриманих в ході моделювання, із експериментальними даними співпадають, що показано на рис. 3.18.

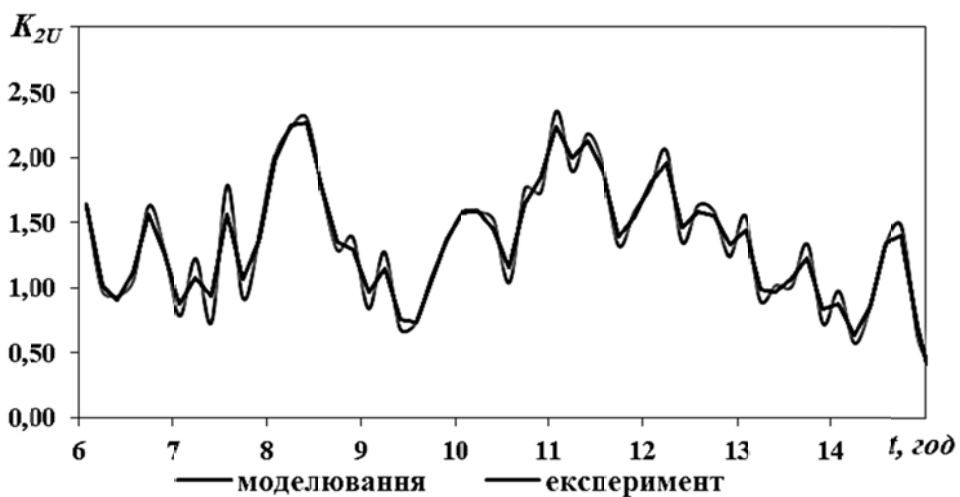


Рисунок 3.18 – Зміна небалансу напруги у колі споживача лінії ДПР

Загальний результат перевірки адекватності представлено у табл. 3.10, де приведені середні значення показників несиметрії та несинусоїдності напруги, отримані під час експерименту та розраховані на моделі. Розходження із експериментальними результатами не перевищує відносної похибки у 4,5%

Для оцінки адекватності використано непараметричний критерій незалежних вибірок Смирнова, критичне значення якого розраховане за методикою [22, с.82] при рівні значущості 5% становить 0,054. Найбільші абсолютні значення розходжень інтегральних функцій розподілу D_{max} , отриманих емпірично та на моделі, приведені у табл. 3.10. Функції розподілу K_{2U} показані на рис. 3.19.

Таблиця 3.10 Порівняння експериментальних даних із результатами моделювання

Інтервали часу, год	Середнє значення K_{2U} , %		$ D_{max} $
	Експеримент	Моделювання	
06:00-09:00	2,25	2,18	0,025
09:00-12:00	1,41	1,34	0,022
12:00-15:00	1,55	1,61	0,025

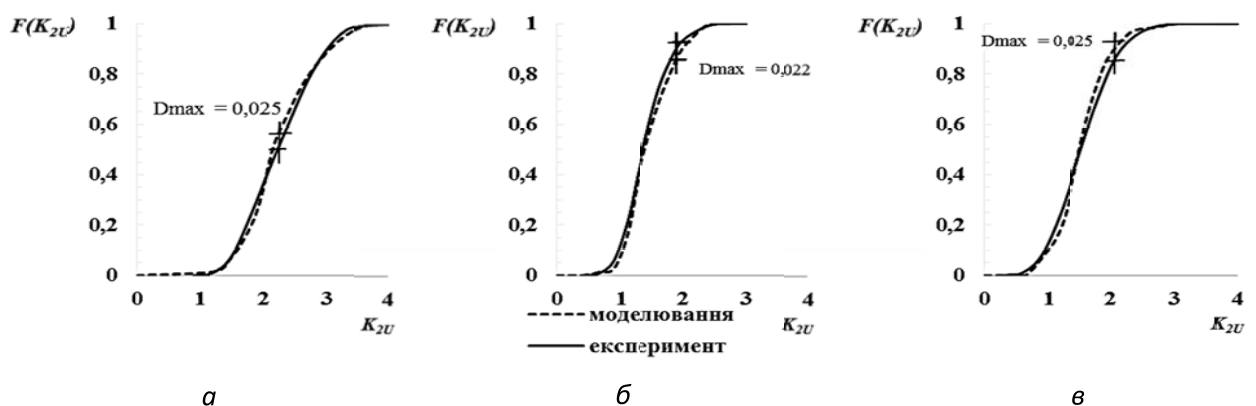


Рисунок 3.19 – Кумулятивні криві ймовірності коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності: *a* – консольне живлення від підстанції Чубівка; *б* – двостороннє живлення від підстанцій Чубівка та Слобідка; *в* – консольне

живлення від підстанції Слобідка

Отримане максимальне значення відхилення між функціями імовірності не перевищує граничного значення. Отже, вибірки є однорідними та підкоряються одному закону розподілу.

Таким чином, вищевикладене дозволяє вважати модель адекватною на підставі прийняття гіпотези про відповідність розподілів цих величин, отриманих моделюванням та експериментально.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						66
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НЕТЯГОВИМ СПОЖИВАЧАМ ЗАЛІЗНИЦЬ ЗМІННОГО СТРУМУ

Конструкція ліній ДПР та її гальванічний зв'язок із тяговою мережею через шини підстанції та рейки обумовлює погіршення якості електроенергії, що передається нетяговим споживачам. Крім того безпосереднє приєднання трифазних ліній до тягових шин суміжних підстанцій із різними конфігураціями систем векторів напруги робить неможливим двостороннє електропостачання нетягових споживачів. У результаті система ліній ДПР поступається у електромагнітній сумісності та у можливості забезпечення двостороннього живлення перед звичайними трипровідними лініями мереж загального призначення.

4.1 Моделювання системи електропостачання залізниці при односторонньому живленні нетягових споживачів

Для моделювання задано статичну систему електропостачання залізниці, яка має шість тягових підстанцій, розташованих рівномірно вздовж однієї лінії електропередачі із двостороннім живленням (рис. 4.1)

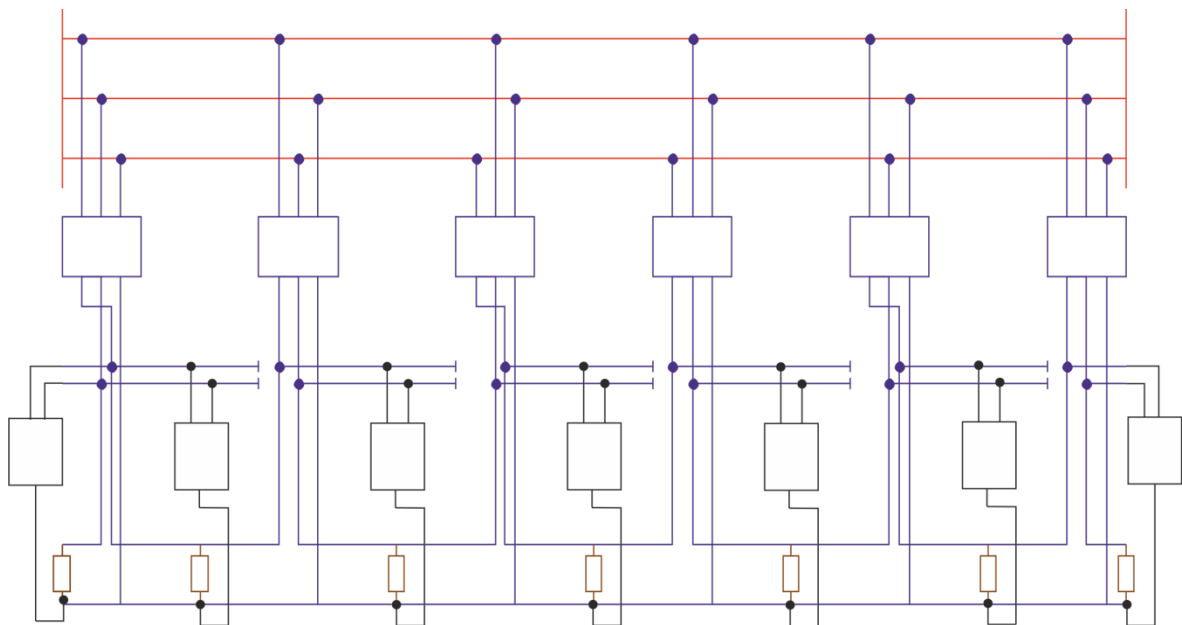


Рисунок 4.1- Система електропостачання ділянки залізниці та нетягових споживачів від лінії ДПР

Тягова мережа живить одноколійну ділянку, на якій знаходяться 35 електровозів ВЛ80, що зведені до еквівалентного тягового навантаження, розташованого уздовж рівномірно. Розташування нетягових споживачів, об'єднаних у еквівалентне трифазне навантаження, співпадає із миттєвим положенням електрорухомого складу. Відстані між підстанціями уздовж трифазної лінії електропередачі та тягової мережі однакові та складають 50 км. Довжина кожної консолі живлення залізничної лінії та частин трифазної лінії системи зовнішнього електропостачання від крайніх підстанцій до приєднання електроенергетичної системи становить 25 км.

Параметри системи на рис. 4.1 є наближеними і відповідають конфігурації реальної системи електропостачання залізниці. Прийнята для розрахунку абстрактна модель системи відтворює схему чергування тягових підстанцій, які отримують живлення із двох сторін, що дозволяє розглядати симетричну відносно джерела систему, спрощуючи аналіз електроенергетичних процесів у ній.

Отримані при моделюванні системи електропостачання, зображені на рис. 4.1, значення струмів електровозів, нетягового споживача лінії ДПР та у системі зовнішнього електропостачання приведені нижче на осцилограмах (рис. 4.2-4.5).

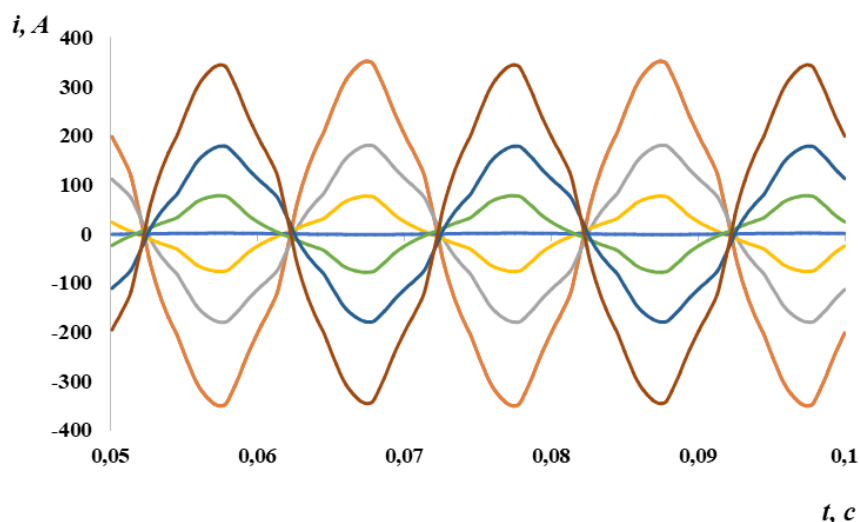


Рисунок 4.2 - Осцилограми струмі у різних частинах однієї фази лінії системи зовнішнього електропостачання

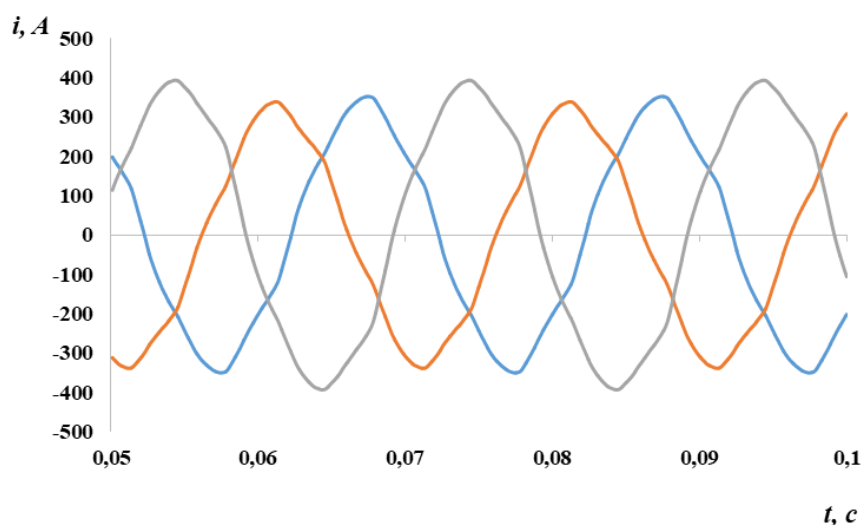


Рисунок 4.3 - Осцилограми вхідних струмів лінії електропостачання

На рис. 4.2 зображено струми, що протікають у фазі лінії системи зовнішнього електропостачання. Найбільше середньоквадратичне значення струму на ділянці між джерелом та першою підстанцією – 237 А, на ділянці мережі між третьою та четвертою тяговою підстанцією – наближається до одного ампера. На рис. 4.3 струми джерела живлення, що входять до лінії системи зовнішнього електропостачання з лівої сторони на рис. 4.1, ступінь їх несиметрії за коефіцієнтом зворотної послідовності становить 2,9%. Загальні втрати активної потужності у системи зовнішнього електропостачання склали 4 516 кВт.

Струми трьох пар еквівалентних електровозів (першого та сьомого, другого та шостого, третього та п'ятого) перебувають у фазі, тому накладаються на діаграмі (рис. 4.4). Різниця між еталонним, заданим значенням струму реального електровозу і розрахованим складає до 4%. Крива заданого струму зображена курсивом на рис. 4.4. Діюче значення отриманого при моделюванні первинного струму еквівалентного електровозу становить 480...500 А.

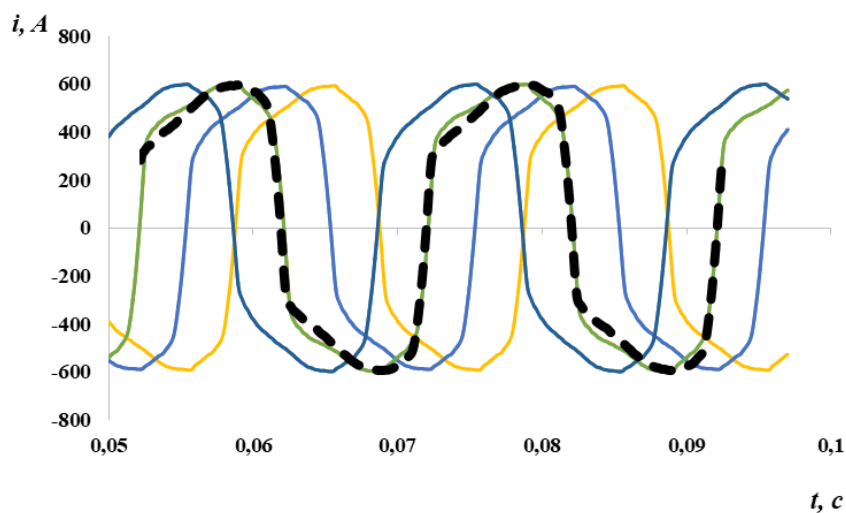


Рисунок 4.4- Первинні струми еквівалентних електровозів

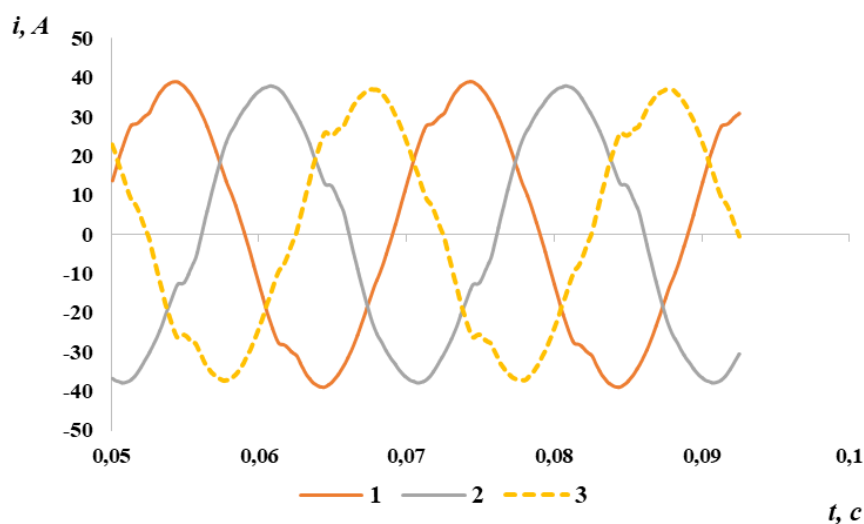


Рисунок 4.5 - Осцилограми вхідного струму нетягового споживача, що отримує живлення за консольною схемою; 1, 2 - від фазних проводів лінії ДПР; 3 - від рейки

На рис. 4.5 показано часову діаграму струмів нетягового споживача, які за консольної схеми протікають у фазах лінії ДПР. Несиметрія струмів за зворотною послідовністю на рівні 3,3%.

Таблиця 4.1 Показники якості на приєднанні тягової підстанції при консольному живленні нетягового споживача

Підстанція	K_{2U}	$K_{U_{AB}}$	$K_{U_{AC}}$	$K_{U_{CA}}$
1	0,10	0,94	1,00	0,99
2	0,33	2,18	2,31	2,53
3	0,57	3,20	2,94	3,54
4	0,57	3,20	2,94	3,55
5	0,36	2,19	2,31	2,53
6	0,10	0,95	1,01	1,00

Таблиця 4.2 Показники якості на приєднанні нетягового споживача до лінії ДПР із одностороннім живленням

Підстанція	$K_{2U}, \%$	$K_{U_{AB}}, \%$	$K_{U_{AC}}, \%$	$K_{U_{CA}}, \%$
1	1,49	5,85	11,95	10,51
2	1,93	7,82	9,46	9,74
3	1,50	5,92	8,50	8,61
4	2,85	8,38	6,79	9,55
5	1,95	6,42	8,71	9,32
6	1,91	8,16	6,25	8,41
7	1,73	5,94	12,36	11,00

Значення несинусоїдної напруги змінюється у вузькому діапазоні у місці приєднання окремої підстанції, але, у зв'язку з чергуванням приєднань фаз тягового трансформатора до лінії, найбільше значення коефіцієнту несинусоїдності спостерігається у різних міжфазних напругах на ввіді підстанції. Найменш

спотворену гармоніками та небалансом струмів у лінії напругу зафіксовано на третій та четвертій підстанції.

Найбільше значення коефіцієнту несиметрії напруги зворотної послідовності отримано на споживачі, що приєднаний до третьої підстанції, найменше – на нетяговому споживачі шостої підстанції. На всіх приєднаннях нетягового споживача найбільшого спотворення вищими гармоніками зазнала напруга між фазою С (рейка) та А.

У табл.4.3 приведені значення повної, активної та реактивної потужності джерела, що живить систему електропостачання (вхідна потужність), та споживача (вихідна потужність). Значення втрат активної потужності у заданій системі електропостачання при консольному живленні нетягового споживача від лінії ДПР отримано як різницю між потужністю, яку віддає джерело (електроенергетична система), та потужністю тягового та нетягового навантаження.

Загальні втрати активної потужності у системі тягового, зовнішнього електропостачання та нетяговій мережі складають 8 430 кВт або 12,8% від вхідної активної потужності.

Таблиця 4.3 Вхідна та вихідна потужність у системі електропостачання при консольному живленні нетягового споживача

Потужність	Віддана потужність електроенергетичною системою	Споживана потужність нетяговими споживачами	Споживана потужність тяговими споживачами
Повна, кВА	97 841	7 167	68 467
Активна, кВт	65 774	7 116	50 228
Реактивна, квар	72 433	854	46 527
Коефіцієнт потужності	0,67	0,90	0,73

4.2 Моделювання двостороннього живлення нетягових споживачів

Тягові підстанції приєднаємо однаково до лінії зовнішнього електропостачання, що створить умови для паралельної роботи тягових трансформаторів суміжних підстанцій на трифазне навантаження. У цьому разі виникне можливість поєднати окремі лінії ДПР у єдину трифазну мережу, зображену на рис. 4.6.

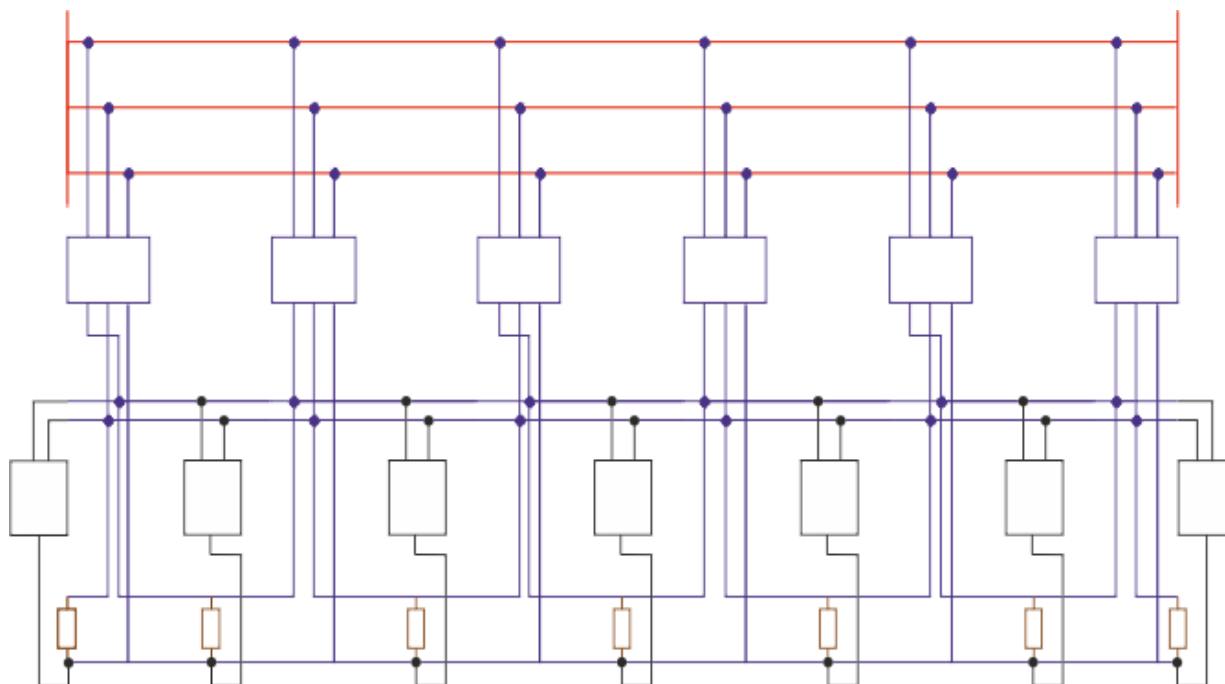


Рисунок 4.6 - Система електропостачання ділянки залізниці при двосторонньому живленні нетягового споживача від лінії ДПР

На відтвореній у математичній моделі схемі ділянки електропостачання із двостороннім живленням нетягових споживачів від лінії ДПР отримані результати, що представлено у вигляді часових діаграм на рис. 4.7-4.10 та зведених в таблиці 4.4 та 4.5.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						73
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

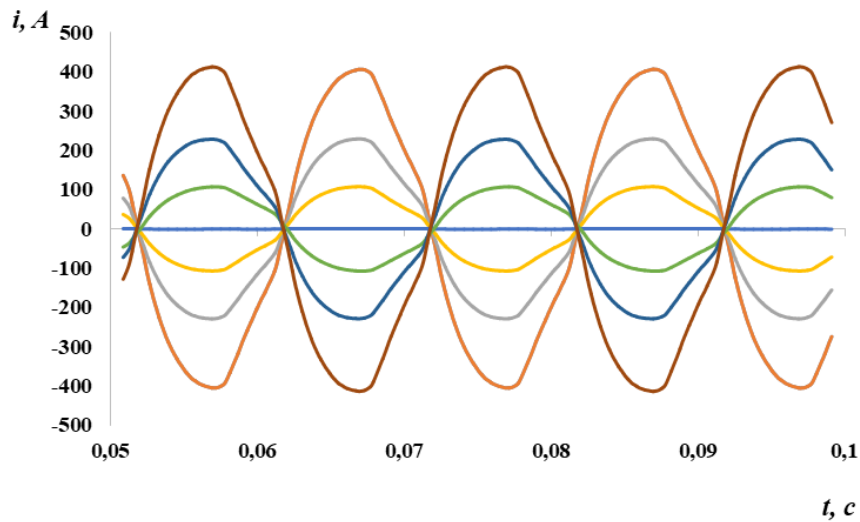


Рисунок 4.7 - Осцилограми струмів у різних частинах однієї фази лінії системи зовнішнього електропостачання при двосторонньому живленні нетягового споживача від лінії ДПР

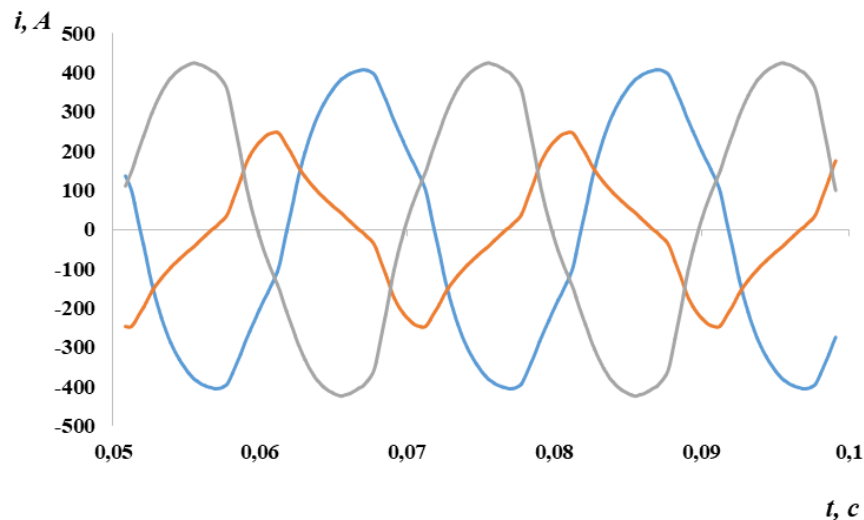


Рисунок 4.8 Осцилограми вхідних струмів лінії електропостачання при двосторонньому живленні нетягового споживача від лінії ДПР

На рис. 4.8 струми в одній фазі лінії системи зовнішнього електропостачання. Значення струму на ділянці між електроенергетичною системою та підстанціями збільшилось на 9% у порівнянні зі струмом у цьому місці при розрахунку схеми, що зображено на рис. 4.2, та становить 296 А. За умови однакового підключення тягових підстанцій до живлячої мережі несиметрія струмів, що входять у лінію від лівої електроенергетичної системи, збільшується до 27% (рис. 4.9). Втрати активної потужності у системі зовнішнього електропостачання збільшились та становлять

4 855 кВт.

За такої схеми живлення системи тягового електропостачання первинний струм першого електровозу перебуватиме у фазі зі струмом третього, п'ятого та шостого електрорухомого складу, а струм другого електровозу – зі струмом четвертого і шостого (рис.4.10).

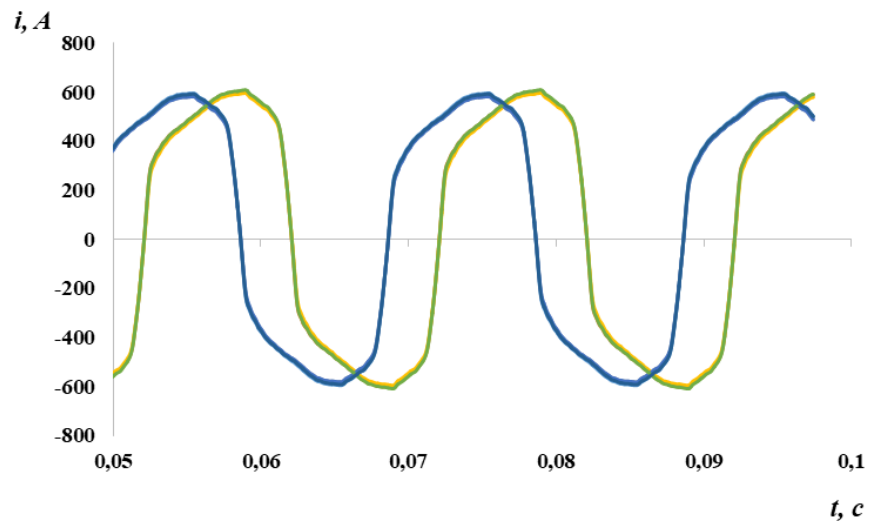


Рисунок 4.9 -Первинні струми електроозів при двосторонньому живленні нетягового споживача

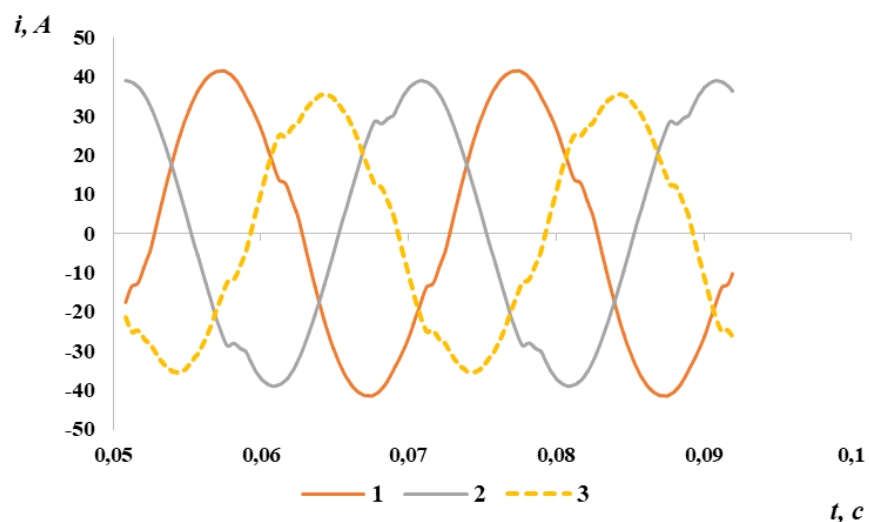


Рисунок 4.10- Осцилограми вхідного струму нетягового споживача при двосторонньому живленні нетягового споживача: 1,2 - від фазних проводів лінії ДПР; 3 - від рейки

Отримані значення коефіцієнтів несиметрії та несинусоїдності напруги на приєднанні тягової підстанції при моделюванні схеми на рис. 4.6 зведено до табл. 4.4. У результаті моделювання схеми з приєднанням схем тягових підстанцій на трифазне навантаження та двостороннім живленням нетягового споживача від лінії ДПР на крайніх підстанціях зафіксовано найменше значення коефіцієнта несиметрії напруги, який збільшується із наближенням до третьої та четвертої підстанції. На всіх приєднаннях тягових підстанцій найбільше гармонічних спотворень спостерігається у нарузі між фазами *C* та *A*.

Несиметрія струмів для першого нетягового споживача у цьому разі збільшилась на 5% (рис. 4.10). Проте на значення характеристик напруги живлення нетягових споживачів перехід на двостороннє живлення від лінії ДПР має більший вплив. Показники якості електроенергії, яку отримують нетягові споживачі приведені у табл. 4.5.

У результаті моделювання на нетягових споживачах зафіксовано збільшення несиметрії напруги, зміна несинусоїдності міжфазної напруги має більш складний характер: наявне як збільшення спотворення напруги, так його зменшення на окремих приєднаннях у межах 1%.

Таблиця 4.4 Показники якості на приєднання тягової підстанції при паралельній роботі тягових трансформаторів на трифазне навантаження

Підстанція	K_{2U}	$K_{U_{AB}}$	$K_{U_{AC}}$	$K_{U_{CA}}$
1	0,82	1,16	1,75	1,82
2	1,53	3,09	3,67	3,86
3	1,87	4,14	4,70	5,00
4	1,89	4,17	4,68	4,98
5	1,59	3,09	3,63	3,92
6	0,87	1,20	1,69	1,80

Таблиця 4.5 Показники якості на приєднанні споживача при двосторонньому живленні нетягового споживача

Підстанція	$K_{2U}, \%$	$K_{U_{AB}}, \%$	$K_{U_{AC}}, \%$	$K_{U_{CA}}, \%$
1	2,77	6,04	13,11	11,24
2	3,40	7,26	10,00	8,65
3	4,62	7,94	9,15	8,88
4	4,20	8,34	9,41	9,12
5	4,20	7,79	9,12	8,67
6	2,75	6,48	10,32	9,27
7	2,94	5,97	12,37	11,28

Віддана електроенергетичною системою та спожита споживачами потужність представлена у табл. 4.6. Під час передачі електроенергії системою електропостачання із об'єднаними у єдину мережу лініями ДПР втрати активної потужності становлять 8 358 кВт або 12,86% від потужності, що надійшла у систему. При цьому енергосистема зменшила видачу потужності на 1,2%, нетягові споживачі загалом спожили на 6,7% більше, а електрорухомий склад недоотримав 2,3%.

Таблиця 4.6 Вхідна та вихідна потужність у системі електропостачання при двосторонньому живленні нетягового споживача

Потужність	Віддана потужність електроенергетичною системою	Споживана потужність нетяговими споживачами	Споживана потужність тяговими споживачами
Повна, кВА	100 421	7 548	66 603
Активна, кВт	64 997	7 484	49 043
Реактивна, квар	76 550	907	45 063
Коефіцієнт потужності	0,65	0,90	0,73

Вхідна реактивна потужність збільшилась на 5,7%, відповідно зменшився коефіцієнт потужності системи електропостачання на 0,02 одиниці.

4.3 Моделювання двостороннього живлення нетягових споживачів від три провідної лінії із використанням фазо поворотного пристрою

На рис. 4.11 показано розрахункову схему системи електропостачання залізниці з приєднаним до шин тягової підстанції фазоповоротним пристроєм та трипровідною мережею нетягового електропостачання.

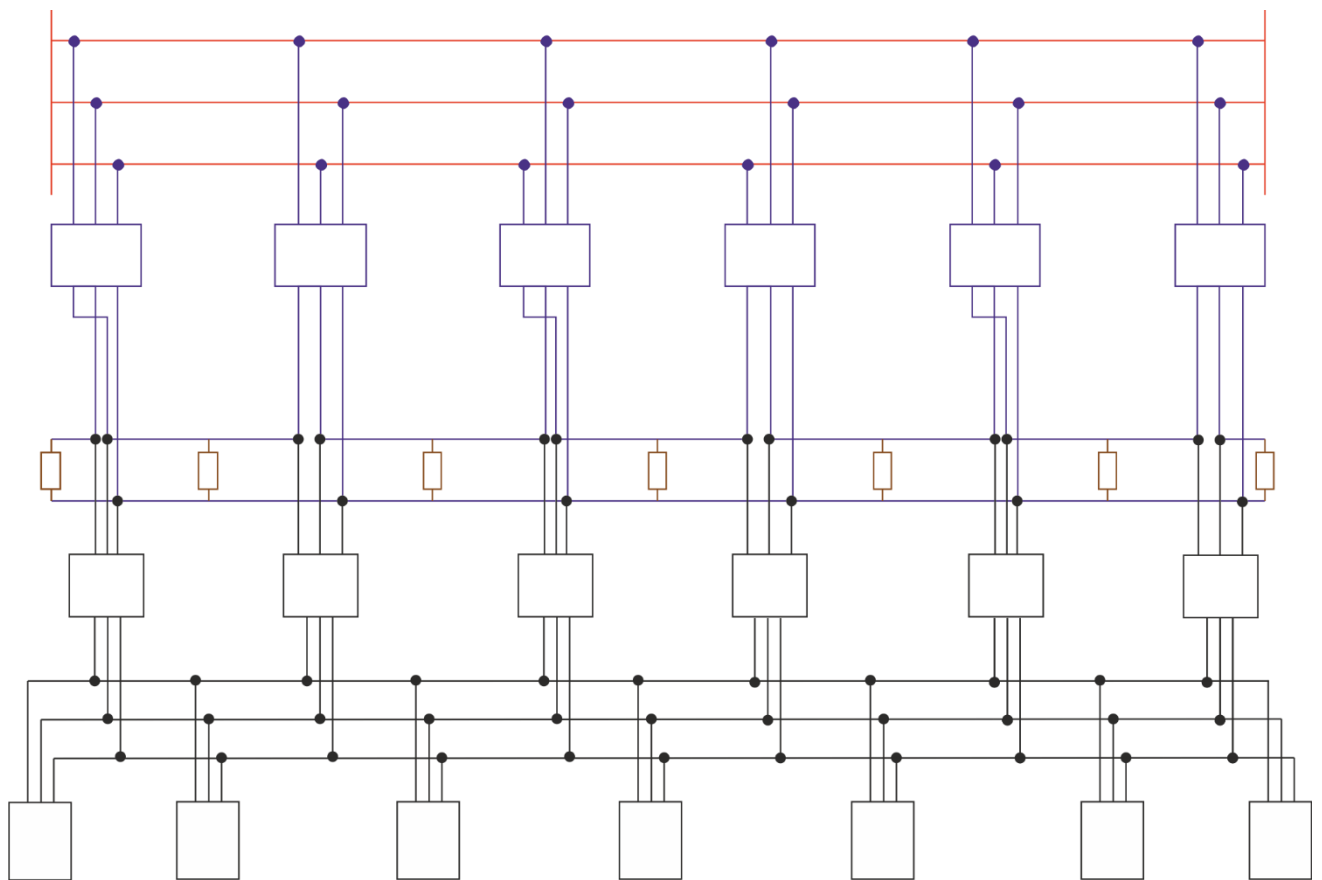


Рисунок 4.11 - Система електропостачання ділянки залізниці із живленням нетягового споживача через фазоповоротний пристрій та трипровідну лінію

Параметри три провідної лінії нетягового електропостачання прийняті симетричними та рівними параметрам першої фази лінії ДПР.

Параметри ФПП прийняті наближено, враховуючи вимоги технічних умов до

силових трансформаторів.

Оскільки нетягове навантаження нерівномірно розподілене між тяговими підстанціями, то номінальна потужність ФПП повинна бути не меншою за 2 141 кВА, що у 1,5 рази більше за потужність одного споживача. Найближче значення із номінального ряду потужностей трансформаторів – 2 500 кВА. Орієнтовні значення, необхідні визначення параметрів ФПП, потужності та струму холостого ходу, потужності та напруги короткого замикання, прийняті за [23] та [24] для масляного трансформатора потужністю 2500 кВА із високою напругою 35 кВ та становлять відповідно 5 кВт та 1,2%. Для розрахунку геометричних розмірів та витків ФПП застосовано методичку описану [25]. Отримані параметри для підстановки у модель приведено у табл. 4.7.

Таблиця 4.7 Параметри фазоповоротного пристрою

Параметр	Значення
Активний опір обмотки з 27,5 кВ на фазу, Ом	1,5
Активний опір обмотки з $27.5/\sqrt{3}$ кВ на фазу, Ом	0,5
Індуктивність розсіяння обмотки з 27,5 кВ на фазу, Гн	0,048
Індуктивність розсіяння обмотки з $27.5/\sqrt{3}$ кВ на фазу, Гн	0,016
Кількість витків з 27,5 кВ на фазу	1071
Кількість витків $27.5/\sqrt{3}$ кВ на фазу	618
Магнітна індуктивність крайніх стержнів магнітної системи, с/Гн	1,5
Магнітна індуктивність середнього стержня магнітної системи, с/Гн	0,5

На рис. 4.12-4.15 та у табл. 4.8-4.10 приведені результати розрахунку системи електропостачання зображеній на рис. 4.11.

На рис. 4.12 часова діаграма розподілу струму в одній фазі лінії системи зовнішнього електропостачання. Діюче значення струму ділянки лінії між джерелом

та першою підстанцією становить 260 А, на ділянці між третьою та четвертою підстанцією значення цього струму наближається до 1 А.

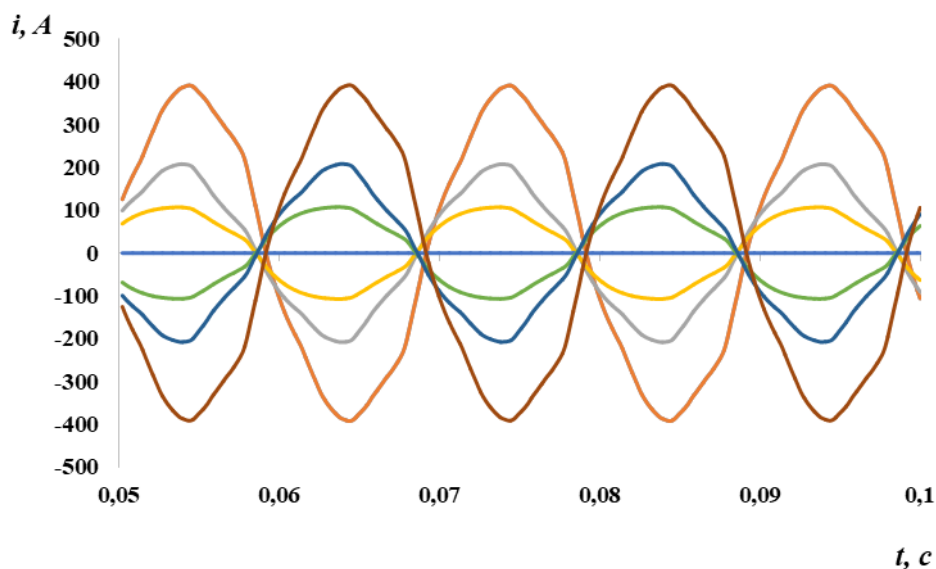


Рисунок 4.12 - Осцилограма струмів у різних частинах однієї фази лінії системи зовнішнього електропостачання при живленні нетягового споживача від трипровідної лінії

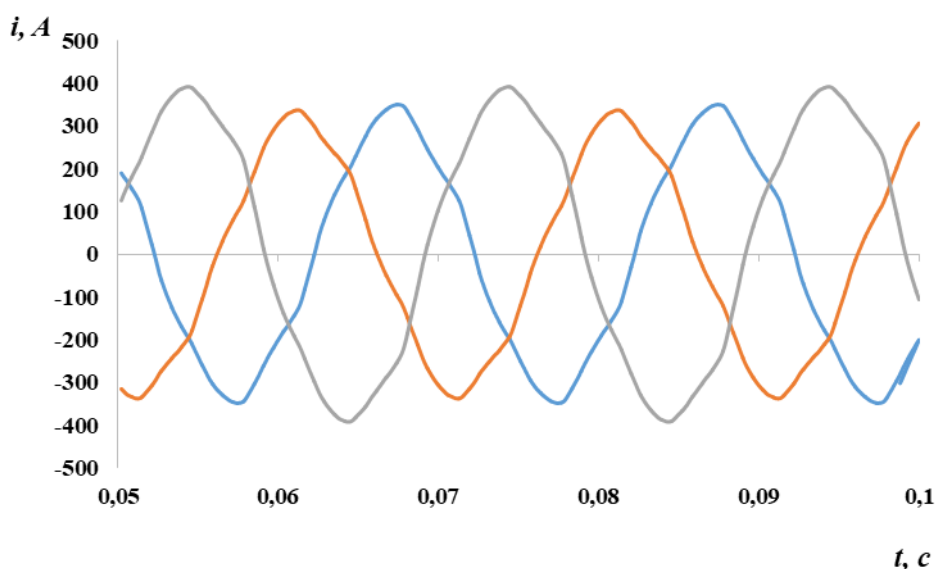


Рисунок 4.13 - Осцилограми входних струмів лінії електропостачання при живленні нетягового через фазоповоротний пристрій та трипровідну лінію

Систма струмів, що входить в лінію від електроенергетичної системи, несиметрична та оцінюється за коефіцієнтом зворотної послідовності у 3,3%. Загальні втрати активної потужності у системі зовнішнього електропостачання збільшились відносно втрат у системі на рис. 4.2 та становлять 4 522 кВт.

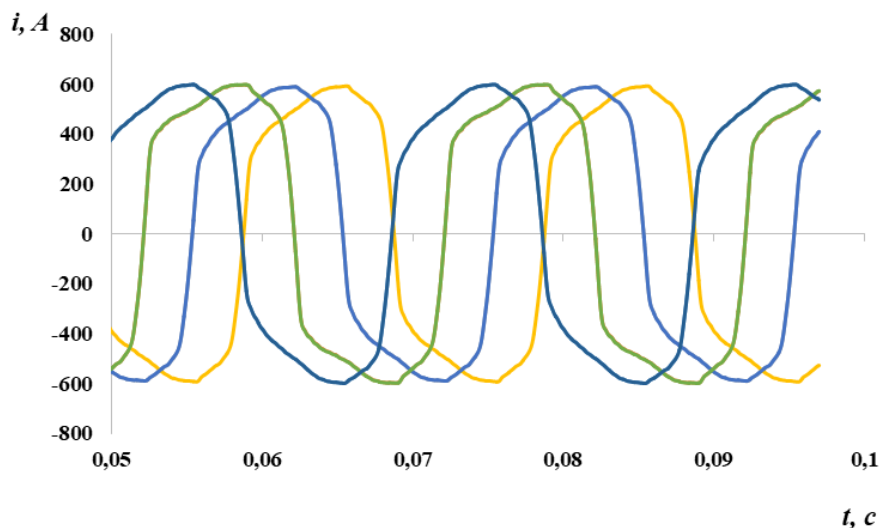


Рисунок 4.14 - Первинні струми еквівалентних електровозів при живленні нетягового споживача від трипровідної лінії

На рис. 4.15 показані часові діаграми струмів нетягового навантаження, із несиметрією системи векторів на рівні 1,3%

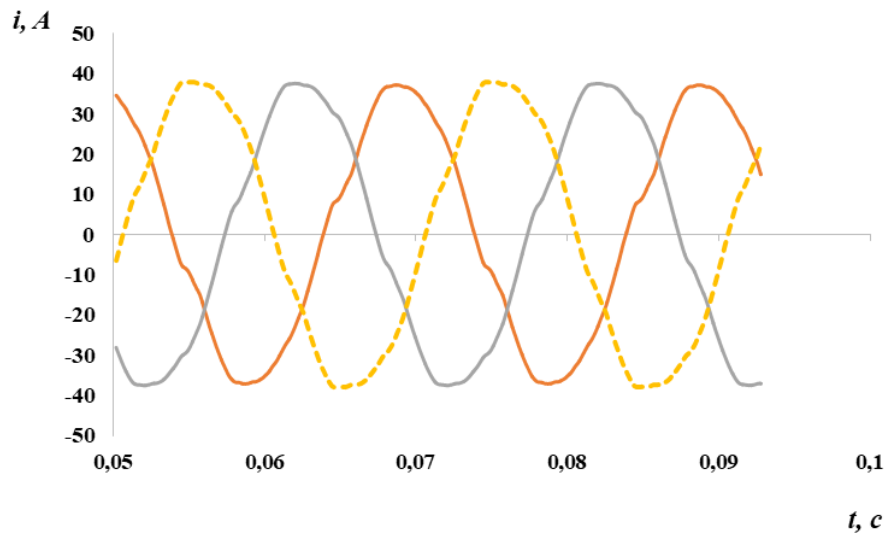


Рисунок 4.15 - Осцилограми вхідних струмів нетягового споживача при живленні нетягового споживача від трипровідної лінії

Несиметрія та несинусоїдність напруги в точках приєднання тягових підстанцій (табл. 4.8) збільшилась в порівнянні з даними приведеними у табл. 4.1, але менше ніж у разі підключення однакового підключення тягових підстанцій до живлячої мережі, системи зовнішнього електропостачання.

Таблиця 4.9 Показники якості на приєднанні тягової підстанції до системи зовнішнього електропостачання при живленні нетягового споживача від трипровідної лінії

Підстанція	K_{2U}	$K_{U_{AB}}$	$K_{U_{AC}}$	$K_{U_{CA}}$
1	0,04	0,90	0,89	0,91
2	0,39	2,18	2,29	2,46
3	0,60	3,18	2,90	3,47
4	0,61	3,18	2,91	3,48
5	0,39	2,20	2,29	2,48
6	0,04	0,91	0,90	0,91

Отримані для даної схеми електропостачання значення показників якості на приєднанні нетягових споживачів зведені до табл. 4.10. можна зробити висновок що значення показника несиметрії та несинусоїдності напруги на нетягових споживачах зменшилось у порівнянні із значеннями, отриманими при моделюванні системи із консольним живленням нетягових споживачів.

Таблиця 4.10 Показники якості на приєднанні нетягового споживача до трипровідної лінії

Підстанція	K_{2U}	$K_{U_{AB}}$	$K_{U_{AC}}$	$K_{U_{CA}}$
1	1,45	6,45	8,43	5,68
2	0,89	4,89	6,02	5,56
3	1,16	6,22	5,53	5,17
4	2,03	6,99	6,26	5,90
5	1,23	6,42	5,53	5,32
6	0,94	5,07	6,02	5,72
7	1,48	6,49	8,42	5,75

Значення потужності, відданої електроенергетичною системою та витраченої споживачами, приведено у табл. 4.11.

Таблиця 4.11 Вхідна та вихідна потужність у системі електропостачання при живленні нетягового споживача через фазо поворотний пристрій та трипровідну лінію

Потужність	Віддана потужність електроенергетичною системою	Споживана потужність нетяговими споживачами	Споживана потужність тяговими споживачами
Повна, кВА	98 119	7 294	68 711
Активна, кВт	65 972	7 244	50 454
Реактивна, квар	72 630	853	46 643

Коефіцієнт потужності	0,67	0,90	0,73
-----------------------	------	------	------

При збереженні коефіцієнту потужності (табл. 4.3) споживачі збільшили своє енергоспоживання, що свідчить про зменшення спаду напруги у елементах системи електропостачання.

4.4 Зіставлення та аналіз результатів моделювання

Використовуючи отримані результати моделювання системи із консольним живленням нетягових споживачів як зразок, порівняймо їх із результатами розрахунку систем із двостороннім живленням споживачів.

У табл. 4.12 та 4.13 вказано у скільки разів значення показників якості електричної енергії у системі з двостороннім живленням через ДПР та ФПП перевищують зразкові.

Таблиця 4.12 Порівняння показників якості електроенергії у місці приєднання тягових підстанцій до живлячої лінії

Підстанція	K_{2U}		$K_{U_{AB}}$		$K_{U_{AC}}$		$K_{U_{CA}}$	
	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП
1	8,20	0,40	1,23	0,96	1,75	0,89	1,84	0,92
2	4,64	1,18	1,42	1,00	1,59	0,99	1,53	0,97
3	3,28	1,05	1,29	0,99	1,60	0,99	1,41	0,98
4	3,32	1,07	1,30	0,99	1,59	0,99	1,40	0,98
5	4,42	1,08	1,41	1,00	1,57	0,99	1,55	0,98
6	8,70	0,40	1,26	0,96	1,67	0,89	1,80	0,91

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

Таблиця 4.13 Порівняння показників якості електроенергії у місці приєднання нетягового споживача до живлячої лінії

Підстанція	K_{2U}		$K_{U_{AB}}$		$K_{U_{AC}}$		$K_{U_{CA}}$	
	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП	ДПР	ФПП
1	1,86	0,97	1,03	1,10	1,10	0,71	1,07	0,54
2	1,76	0,46	0,93	0,63	1,06	0,64	0,89	0,57
3	3,08	0,77	1,34	1,05	1,08	0,65	1,03	0,60
4	1,47	0,71	1,00	0,83	1,39	0,92	0,95	0,62
5	2,15	0,63	1,21	1,00	1,05	0,63	0,93	0,57
6	5,39	0,49	0,79	0,62	1,65	0,96	1,10	0,68
7	1,70	0,86	1,01	1,09	1,00	0,68	1,03	0,52

Отже, у системі електропостачання з двостороннім живленням нетягових споживачів від лінії ДПР істотно погіршується якість напруги: у місці приєднання тягових підстанцій небаланс напруги зростає в середньому у п'ять разів, несинусоїдність у 1,5 рази, на нетягових споживачах несинусоїдність напруги збільшилась у 2,5 разів, а рівень спотворення форми напруги – до 1,65 разів.

У системі з ФПП має місце збільшення небалансу напруги на підстанціях лише до 1,18 разів, рівень несинусоїдності напруги практично не змінився. У місці приєднання нетягових споживачів несиметрія та несинусоїдність напруги зменшились у середньому на 30% та 45% відповідно.

Проведемо оцінку втрат електроенергії у системі електропостачання при різних способах живлення нетягових споживачів. Керуючись даними про середньомісячний транзит електроенергії через тягові підстанції змінного струму, що становить 5-6 кВт·год, та відносим значенням втрат потужності в елементах системи електропостачання, отриманих під час моделювання, розраховано втрати електроенергії за рік роботи розглянутих систем електропостачання. Отриманий об'єм

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						85
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

втраченої при передачі електричної енергії приведено у табл. 4.14.

У аспекті втрат електричної енергії при її передачі нетяговою мережею доцільніше використовувати систему електропостачання з двостороннім живленням споживача через ДПР, що стає можливим у разі однакового приєднання тягових підстанцій до системи зовнішнього електропостачання.

Таблиця 4.14 Втрати електроенергії у частинах системи електропостачання за рік, МВт·год

Спосіб живлення споживача	Загальні	Система зовнішнього електропостачання	Система тягового електропостачання	Система нетягового електропостачання (ДПР/ФПП)
ДПР	49 350	26 544	20 487	2 319
двостороннє ДПР	50 851	29 064	20 620	1 167
двостороннє ФПП	48 407	26 493	20 484	1 430

Живлення через ФПП зменшує до 40% втрати електроенергії у системі нетягового електропостачання, яка включає в собі трипровідну лінію та сам фазоповоротний пристрій, проти майже 50% при двосторонньому живленні споживача від лінії ДПР.

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі на основі результатів теоретичних і експериментальних досліджень вирішено наукову задачу підвищення ефективності електропостачання нетягових споживачів, що отримують живлення від шин напругою 27,5 кВ підстанцій залізниць змінного струму.

В результаті аналізу даних вимірювання режимних параметрів системи нетягового електропостачання на шинах 27,5 кВ тягової підстанції та у місці приєднання споживача до лінії «два проводи-рейка», зафіксовано зниження якості електричної енергії, що характеризується показниками відхилення та несиметрії напруги. Максимальне значення відхилення напруги у місці приєднання споживача збільшилось з 4 % до 7 %. Максимальне значення коефіцієнта несиметрії напруги зворотної послідовності з 3 % зросло до 7 %. Ймовірність перевищення нормально допустимого значення відхилення напруги на шинах підстанції зростає з 0 % до 40 % у мережі споживача, а коефіцієнта зворотної послідовності напруги збільшилась з 9 % до 30 %.

Аналіз результатів експериментальних вимірювань напруги показав, що у режимі двостороннього живлення покращується якість електричної енергії у місці приєднання споживача до лінії «два проводи-рейка». Запропонований метод підвищення ефективності передачі електричної енергії нетяговим споживачам, що отримують живлення від лінії «два проводи-рейка», дозволяє забезпечити можливість одночасного живлення споживачів від суміжних тягових підстанцій із різними конфігураціями систем векторів лінійної напруги. Для приведення різних типів систем векторів напруги на тягових шинах суміжних підстанцій до однієї форми передбачається використання фазоповоротного пристрою. Живлення споживачів забезпечується від тягових шин підстанції через фазоповоротний пристрій, схема з'єднань обмоток та приєднання до тягових шин підстанції фазоповоротного пристрою залежить від способу приєднання тягового трансформатора до живлячої мережі.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						7
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Спосіб зниження несиметрії напруги тягової підстанції змінного струму: пат. № 48536 Україна: МПК H02J 3/26 / Сиченко В.Г., Босий Д.О.; заявник та власник патенту Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. ак. В.Лазаряна. – № U200909253; заявл. 08.09.09; опубл. 25.03.10, Бюл. № 6. – 2 с Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник, изд. 11-е. - М.: "Гардарики", 2006. - 701 с.

2. Гамазин С. И. Обеспечение надежности электроснабжения и качества электроэнергии / С. И. Гамазин, В. М. Пупин, Ю. В. Марков. – Промышленная энергетика, № 11. – 2006.

3. Бородулин Б. М. Симметрирование токов и напряжений на действующих тяговых подстанциях переменного тока [Текст] / Б. М. Бородулин. – Вестник ВНИИЖТ, № 2. – 2003. С. 14– 17.

4. Бочев, А.С. , Финоченко Т.Э. Модернизация линий продольного электроснабжения два провода – рельсы. [Текст]. / А.С. Бочев, Т.Э.Финоченко // Ростов-н/Д.: Вестник РГУПС №4, 2006. С.87-90.

5. Косарев, А.Б. Основы теории электромагнитной совместимости систем тягового электроснабжения переменного тока. - М.: Интекст, 2004. - 272 с.

6. Крюков, А.В. Моделирование электромагнитных влияний контактной сети на смежные линии электропередачи с учетом высших гармоник. [Текст]. / А.В.Крюков, Закарюкин В.П., Кобычев Д.С./ «Современные технологии. Системный анализ. Моделирование». - №3. 2009. –С 132-136.

7. Контактная сеть и воздушные линии. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтным воздушным линиям. Справочник. Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. -М.: Трансиздат, 2001 г.- 512 с.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						8
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

8. Тамазов А. И. Несимметрия токов и напряжений вызываемая однофазными тяговыми нагрузками – М.: Транспорт, 1965. – 235 с.

9. Правила улаштування систем тягового електропостачання залізниць України, затверджені Наказом Укрзалізниці від 24.12.2004 р. № 1010-ЦЗ.

10. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). Київ, ДП «УкрДНЦ», 2014, 32 с.

11. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия и совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Госстандарт Украины, 1999. – 32 с.

12. Про затвердження Інструкції із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6-750 кВ : наказ від 23.05.2014 № 374 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0842-14> (дата звернення 11.07.2019).

13. Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів : наказ від 25.07.2006 № 258 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1143-06> (дата звернення 11.07.2019).

14. Про затвердження форми Акта здійснення заходу з державного енергетичного нагляду (контролю) та внесення змін до наказу Мінпаливенерго від 24.12.2004 № 817 : наказ від 15.11.2010 № 473 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1374-10> (дата звернення 11.07.2019).

15. Правила улаштування електроустановок. Офіц. вид.; чинний від 21.07.2017. Київ, 2017. 617 с.

16. Про затвердження Кодексу систем розподілу : Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №310 //База даних «Законодавство України» /ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						9
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

17. Хачатрян Л. А., Казанський С. В. Про невідповідність чинних стандартів України щодо показників якості електричної. Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики. 2017. С. 156-158

18. Трунова І. М. Лебедева Я. А. Порівняльний аналіз основних нормативних документів щодо якості електричної енергії Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2015. № 165. С. 19-22.

19. Трунова І. М., Мороз О. М.. Деякі питання щодо застосування ДСТУ EN 50160:2014. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. Технічні науки. 2015. Вип. 15, Т. 2. С. 328-331.

20. Влах І., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. Москва : «Радио и связь», 1988. 560 с.

21. Доманський І. В. Теоретичні основи енергоефективності та ресурсозбереження систем тягового і зовнішнього електропостачання залізниць : дис. ... д-ра. тех. наук : 05.22.09 / ХНУМГ. Харків, 2018. 432 с.

22. Блінов І. В. Теоретичні та практичні засади функціонування конкурентного ринку електроенергії. Київ: Наукова думка, 2015. 250 с.

23. Денисюк С. П., Таргонський В. А. Сталий розвиток енергетики України у світових вимірах. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. № 3. С. 7-31.

24. Демерчан К. С., Бутирин П. А. Моделирование и машинный расчет электрических цепей. Москва : Высшая школа, 1988. 335 с.

25. Спосіб забезпечення двостороннього живлення ліній нетягового електропостачання на залізницях однофазного змінного струму : пат. 141152 Україна. № у 201908882 ; заявл. 22.07.19 ; опубл. 25.03.20, Бюл. № 6.

					02.15.ЕС1921.РД.2020 – ПЗ	Арк.
						10
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		