

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій
Управління енергетичними та економічними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання


Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
магістра

на тему: «Дослідження якості електроенергії у системі тягового електропостачання змінного струму»

за освітньою програмою «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»

зі спеціальності: 141 **Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Виконав: студент групи: EE2426



/ Дмитро АНАЙКО /

Керівник:



/ доцент, Денис ЗЕМСЬКИЙ /


Нормоконтролер:



/ доцент Ірина ПОТАПЧУК /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент


_____ (підпис)

Дніпро – 2026 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Energy process management

Intellectual power supply systems

Explanatory Note
to Master's Thesis

on the topic: **“Investigation of Power Quality in the AC Traction Power Supply System”**

according to educational curriculum **“Energy and Electromechanical Systems in Transport”**

in the Speciality: **141 Electric power, electrical engineering and electromechanics**

Done by the student of the group: EE2426

/ Dmytro ANAIKO /

Scientific Supervisor:

/ Ass. Prof., Denys ZEMSKYI /

Normative controller

/ Ass. Prof., Iryna POTAPCHUK /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними та економічними процесами
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
Освітня програма: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»
Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСЕ

_____ Дмитро БОСИЙ
(підпис) (Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата _____

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу _____ магіста

студенту _____ Анайку Дмитру Олександровичу

1. Тема роботи: Дослідження якості електроенергії у системі тягового електропостачання змінного струму

Керівник роботи: _____ Земський Денис Романович, д-р. філос, б.зв.

затверджені наказом від 02.10.2025 р. № 1402

2. Строк подання студентом роботи: 11.01.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: вихідні дані до кваліфікаційної, дані відкритих джерел інформації.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Основні виклики у забезпеченні якості електричної енергії.

4.2 Математичне моделювання спотворень якості електроенергії в системах змінного струму тягового електропостачання

4.3 Дослідження якості електроенергії споживача.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): система тягового електропостачання однофазного змінного струму напругою 25 кВ, схема проведення вимірювань, результати вимірювань

Система електропостачання ділянки залізниці, векторні діаграми напруг системи електропостачання із фпп, підключення фазоповоротного пристрою до шести тягових підстанцій:

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Основні виклики у забезпеченні якості електричної енергії	01.11.2025	
2	Математичне моделювання спотворень якості електроенергії в системах змінного струму тягового електропостачання	15.12.2025	
3	Дослідження якості електроенергії споживача	31.12.2025	
5	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	11.01.2026	
6	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні експертної комісії	21.01.2026	

Студент

_____ (підпис)

Дмитро АНАЙКО

_____ (Ім'я ПІРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Денис ЗЕМСЬКИЙ

_____ (Ім'я ПІРІЗВИЩЕ)

ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Другого (магістерського) рівня вищої освіти Анайко Д.О. на тему: «Дослідження якості електроенергії у системі тягового електропостачання змінного струму»

Складова кваліфікаційної роботи	Кількість	Обсяг
Пояснювальна записка	1	53.
Графічна частина (за наявності)	1	4 арк.
Електронна частина (демонстраційний матеріал): назва файлу з розширенням	1	15 слайдів
Електронна частина (вихідний код програми): назва файлу з розширенням	1	строк

Керівник: _____ / Денис ЗЕМСЬКИЙ /

Нормоконтролер: _____ / Ірина ПОТАПЧУК /

Завідувач кафедри ІСЕ: _____ / Дмитро БОСИЙ /

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра: 53 с, 27 рис., 3 табл., 31 використане джерело.

Об'єкт дослідження – електрична мережа ліній ДПР напругою 25 кВ.

Предмет дослідження – показники ефективності передачі електроенергії в лінії ДПР.

Методи дослідження. Аналітичні розрахунки за регламентованими методиками по виразах, які базуються на класичних положеннях теорії аналізу синусоїдних лінійних електричних кіл в усталеному режимі.

У роботі виконано аналіз сучасного стану передачі електроенергії в мережах із різними групами з'єднання обмоток трансформаторів, зокрема в мережах живлення нетягових споживачів на ділянках системи тяги змінного струму. Проаналізовано відомі напрямки модернізації ліній дистанцій пристроїв рейкового живлення, спрямовані на підвищення ефективності електропередачі до нетягових споживачів, зокрема впровадження режиму двостороннього живлення.

Розглянуто способи забезпечення паралельної роботи трансформаторів, що мають різні схеми підключення до живильної мережі. Також подано методику визначення основних показників ефективності передачі електроенергії в лініях типу «два проводи – рейки», а саме: втрат активної потужності, сталого відхилення напруги у точці приєднання споживача та коефіцієнта несиметрії напруги на навантаженні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕЛЕКТРИЧНА МЕРЕЖА, НЕТЯГОВІ НАВАНТАЖЕННЯ, ДВОБІЧНЕ ЖИВЛЕННЯ, ГРУПА З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК, ФАЗОПОВОРОТНИЙ ПРИСТРІЙ, ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ.

					02.15.EE2426.KPM.2026-ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 ОСНОВНІ ВИКЛИКИ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	11
1.1 Класифікація електромагнітних перешкод	11
1.2 Проблема якості електричної енергії	14
1.3 Вплив відхилень напруги на роботу споживачів електроенергії	18
1.4 Якість електроенергії у мережах нетягових споживачів залізниць	21
1.5 Способи підвищення якості електроенергії	24
1.6 Класифікація засобів покращення якості електроенергії	26
1.7 Висновки до розділу 1	Ошибка! Закладка не определена.
2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЗМІННОГО СТРУМУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	32
2.1 Оцінка несинусоїдності струмів за допомогою активних та обмінних характеристик електротягового навантаження	32
2.2 Дослідження несиметрії в системах електричної тяги методом фазних координат	34
2.3 Опис програмного комплексу «Інтелектуальна система електропостачання транспорту «iSET»	40
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СПОЖИВАЧА	44
3.1 Режими роботи системи електропостачання залізниці	44
ВИСНОВКИ	50
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	52

					02.15.EE2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Анайко Д.О.			Літ.	Арк.	Акрушів
					7	54	
Керівник.		Земський Д.Р.			УДУНТ, ІСЕ, ЕЕ2426		
Н. Контр.		Потапчук І. Ю.					
Зав. каф.		Босий Д.О.					

ВСТУП

Актуальність роботи.

Системи тягового електропостачання (СТЕ) електрифікованих залізниць є складними електротехнічними комплексами, що працюють у тісній взаємодії з мережами зовнішнього електропостачання, системами зв'язку, автоматики, а також із численними нетяговими споживачами. Особливі режими роботи тягових навантажень, наявність нелінійних електроприймачів та значні коливання параметрів мережі обумовлюють істотний вплив СТЕ на якість електричної енергії. Через це питання забезпечення електромагнітної сумісності та стабільних показників якості електроенергії набуває особливої актуальності, зважаючи на сучасні тенденції розвитку залізничної галузі — підвищення швидкостей руху, збільшення інтенсивності поїзного трафіку та посилення вимог з боку енергопостачальних підприємств.

Системи тягового електропостачання змінного струму мають низку специфічних особливостей, що визначають вимоги до характеристик та функціональних можливостей фільтрокомпенсувальних пристроїв, необхідних для покращення показників електроенергії та усунення несиметрії струмів і напруг.

Першою та ключовою особливістю є те, що електрорухомий склад (ЕРС) змінного струму виступає однофазним нелінійним навантаженням. Переважна більшість локомотивів (близько 90 %) обладнані двонапівперіодними випрямними установками та колекторними тяговими двигунами. Це призводить до появи у спектрі споживаного струму низькочастотних непарних гармонік, зокрема 3-ї, 5-ї та 7-ї. Унаслідок цього виникають спотворення синусоїдності напруг не лише у тяговій мережі, а й у магістральних електричних мережах напругою 35, 110 та 220 кВ, від яких живляться тягові підстанції. Такі спотворення негативно впливають на чутливе обладнання нетягових споживачів та можуть призводити до відхилень від норм якості електричної енергії.

Другою важливою особливістю є вплив протяжності контактної мережі, яка

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

має розподілені параметри. На високих частотах гармонік це призводить до появи хвильових процесів, здатних спричинити резонансні явища, включно з небезпечними перенапругами на струмоприймачах електрорухомого складу. Крім того, електромагнітне поле тягової мережі впливає на системи зв'язку, телемеханіки та автоматики, а також на електронне обладнання нетягових споживачів, яке є чутливим до високочастотних завад.

Третьою характерною рисою СТЕ є нестационарність навантажень, що зумовлена постійною зміною режимів роботи ЕРС, а також його рухом уздовж дільниці. Така мінливість викликає суттєві коливання активної та реактивної потужності. Для забезпечення економічності та стабільної роботи системи необхідне динамічне регулювання та компенсація реактивної потужності залежно від поточного тягового навантаження. В іншому разі можливе виникнення відхилень напруги, погіршення енергетичних показників та створення додаткового навантаження на обладнання тягових підстанцій.

Таким чином, дослідження режимів роботи системи тягового електропостачання, аналіз показників якості електроенергії та розробка заходів щодо їх покращення є актуальним і важливим завданням, спрямованим на підвищення ефективності, надійності та безпеки функціонування залізничної інфраструктури.

Зв'язок роботи з науковими програмами.

Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання», Українського державного університету науки і технологій.

Мета і завдання роботи. Метою роботи є підвищення ефективності передачі електроенергії та надійності електропостачання. Для досягнення мети поставлено задачу визначити спосіб забезпечення двостороннього живлення споживачів від ліній «два проводи – рейка».

Об'єкт дослідження – електрична мережа ліній ДПР напругою 25 кВ

Предмет дослідження – показники ефективності передачі електроенергії в лінії ДПР.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Методи дослідження. Аналітичні розрахунки за регламентованими методиками по виразах, які базуються на класичних положеннях теорії аналізу синусоїдних лінійних електричних кіл в усталеному режимі.

Наукова новизна. У роботі на основі аналізу закономірностей формування та зміни систем векторів вихідної напруги тягових трансформаторів з урахуванням схем їх приєднання до первинної мережі розроблено науково обґрунтований метод організації двостороннього живлення ліній нетягового електропостачання від тягових шин підстанцій змінного струму. Запропонований підхід є універсальним для різних конфігурацій систем векторів напруги та забезпечує безперервність електропостачання за умов знижених втрат електричної енергії.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність результатів полягає у можливості їх використання під час проектування, модернізації та експлуатації тягових мереж змінного струму з метою підвищення їх енергоефективності та надійності.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні дослідження, розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих результатів, та формулювання висновків отримані здобувачем самостійно

Апробація результатів магістерської роботи.

Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на 17-ї міжнародної науково-практичної конференції студентів і молодих вчених імені Георгія Кірпи, яка проводилася кафедрою «Залізничний транспорт» Національного університету «Львівська політехніка» 4 грудня 2025 р.

Публікації. Анайко Д. О., Земський Д. Р. Надійність електропостачання нетягових споживачів залізниць змінного струму. «Сучасні транспортні технології» : 17-ї Міжнар. науково-практ. конф. студентів і молодих вчен. ім. Георгія Кірпи, м. Львів, 4 груд. 2025 р. Львів, 2025. С. 171–172.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ОСНОВНІ ВИКЛИКИ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

1.1 Класифікація електромагнітних перешкод

Електромагнітні перешкоди являють собою будь-які електромагнітні явища, що у певних умовах спричиняють погіршення робочих характеристик технічних засобів. У широкому діапазоні частот такі збурення можуть проявлятися як впливи різної природи та інтенсивності. Технічні засоби – електронні системи, елементи електроенергетичних мереж, електричні прилади, радіоелектронна апаратура тощо – розробляються таким чином, щоб у визначених умовах експлуатації протягом усього строку служби виконувати задані функції. Проте на практиці будь-який пристрій постійно зазнає впливу як електричних, так і неелектричних факторів, а також сам створює відповідні впливи на навколишнє середовище.

Під час взаємодії джерела перешкод із чутливим об'єктом виникає негативний ефект – прояв перешкоди.

Гальванічний зв'язок реалізується через спільні провідники, по яких передаються струм або напруга. Ємнісні та індуктивні зв'язки виникають відповідно через електричні та магнітні поля, причому ці поля існують незалежно одне від одного. Випромінювальний зв'язок формується у випадках, коли приймач перебуває у «дальній зоні», а електрична та магнітна складові поля взаємопов'язані й діють одночасно.

Окрім механізмів формування зв'язку, важливими є й шляхи проникнення перешкод. Електромагнітні завади можуть потрапляти всередину пристрою або, навпаки, передаватися ним у зовнішнє середовище такими шляхами:

- Через гальванічний зв'язок – по мережі електроживлення, через інформаційні входи та виходи, ланцюги заземлення, а також унаслідок статичних або атмосферних розрядів (кондуктивні перешкоди);

- Через електричні та магнітні поля (ємнісний та індуктивний вплив), що

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

створюються у навколишньому просторі – так звані індуктивні перешкоди.

За походженням електромагнітні перешкоди поділяються на природні та штучні. Найпоширенішим природним джерелом є електромагнітний імпульс, який виникає під час грозових розрядів. Штучні перешкоди, у свою чергу, поділяють на ті, що створюються функціональними джерелами, та ті, що виникають унаслідок дисфункцій обладнання.

Функціональними вважаються джерела, для яких випромінювана електромагнітна енергія є корисним сигналом (наприклад, передавачі радіозв'язку або обладнання, що використовує мережі живлення для передавання інформації).

Нефункціональні джерела – це об'єкти, у яких електромагнітні перешкоди є побічним продуктом роботи. До них належать провідні комунікації, що формують електромагнітні поля, комутаційні апарати, імпульсні блоки живлення та інші подібні пристрої. Також до цієї групи відносять електростатичні розряди з тіла людини. Основна різниця між цими двома класами полягає в тому, що рівень перешкод від нефункціональних джерел можна часто знизити конструктивними заходами, тоді як для функціональних це зазвичай неможливо.

Умовність поділу перешкод на кондуктивні та індуктивні чітко помітна при аналізі шляхів проникнення високочастотних завад до електронної апаратури. Зазвичай реальний шлях є комбінацією металевих провідників та друкованих доріжок (кондуктивні ділянки), а також паразитних ємнісних та індуктивних зв'язків (індуктивні ділянки). У результаті високочастотна перешкода може потрапляти у високочутливі цифрові контури схеми, оминаючи фільтри, варистори та інші елементи захисту, розраховані на чисто кондуктивний характер впливу. Тому вважати поділ на індуктивні та кондуктивні перешкоди строго коректним можна лише для низьких частот – до десятків кілогерців, коли паразитні зв'язки є незначними.

За ступенем впливу на обладнання електромагнітні перешкоди поділяють на:

- Допустимі – ті, що відповідають встановленим нормам та не порушують

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

спільного використання частот.

- Небезпечні (шкідливі) – здатні суттєво погіршувати роботу служб радіозв'язку, радіонавігації або систем безпеки.

- Прийнятні – перешкоди, рівень яких перевищує допустимий, але їх значення погоджене між відповідними адміністраціями без нанесення шкоди іншим користувачам спектра.

Залежно від спектра електромагнітні збурення поділяють на періодичні, неперіодичні та шумові. Періодичні й неперіодичні сигнали, у свою чергу, можуть бути вузькосмуговими або широкосмуговими.

Вузькосмуговими зазвичай є перешкоди від систем зв'язку з несучою частотою або від мереж змінного струму. Їх характерною рисою є майже синусоїдальна форма сигналу.

Широкосмугові перешкоди, навпаки, мають імпульсний або складний неспектральний характер. Для періодичних широкосмугових сигналів спектр складається з набору гармонік, кратних основній частоті. Для аперіодичних перешкод формується безперервний спектр, описуваний спектральною густиною.

Інша спектральна ознака – частотна область зосередження більшої частини енергії завади. Умовно виділяють низькочастотні (0–9 кГц) та високочастотні перешкоди. Низькочастотні завади переважно створюються силовими електроустановками та лініями. Джерелами високочастотних вузькосмугових сигналів є системи зв'язку, а всі імпульсні завади належать до широкосмугових високочастотних. Часто виділяють радіочастотні перешкоди (150 кГц – 1...2 ГГц) та НВЧ-перешкоди (кілька гігагерц).

Для оцінювання електромагнітної обстановки всі перешкоди умовно поділяють на три категорії:

1. Низькочастотні ЕМП (кондуктивні та випромінювані), окрім електростатичних розрядів;
2. Високочастотні ЕМП (кондуктивні та випромінювані), окрім електростатичних розрядів;

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Електростатичні розряди.

У кожній з них розрізняють певні види перешкод.

Кондуктивні низькочастотні:

- гармоніки та інтергармоніки у мережі живлення;
- спеціальні сигнали, що передаються по мережі живлення;
- коливання, провали та переривання напруги;
- несиметрія фаз у трифазних системах;
- зміна частоти;
- наведені низькочастотні напруги;
- постійна складова в мережах змінного струму.

Індуктивні низькочастотні:

- магнітні поля;
- електричні поля.
- Кондуктивні високочастотні:
- наведені струми та напруги безперервних коливань;
- аперіодичні перехідні процеси;
- коливальні перехідні процеси.
- Індуктивні високочастотні:
- магнітні поля;
- електричні поля;
- електромагнітні поля безперервних та перехідних коливань;
- електростатичні розряди.

1.2 Проблема якості електричної енергії

Вплив електроенергетичних процесів у системах тягового електропостачання на якість електричної енергії є одним із ключових аспектів забезпечення надійної роботи електрифікованого залізничного транспорту. Система тягового електропостачання (СТЕ) електрифікованої залізниці являє собою складну електродинамічну, розгалужену та просторово розподілену систему. Вона функці-

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

онує в умовах значної стохастичності – параметри режиму змінюються у просторі, у площині та в часі, що призводить до постійної зміни електромагнітної обстановки не лише всередині СТЕ, а й у суміжних технічних засобах. До цих суміжних елементів належать система зовнішнього електропостачання, лінії зв'язку, канали передавання даних, системи телеуправління і телесигналізації, рейкові кола та інші пристрої. Через це взаємодії в СТЕ формують складний електромагнітний процес, який має яскраво виражений нестационарний і нелінійний характер.

Будь-яке електромагнітне середовище є наслідком реалізації певного технологічного процесу. Для СТЕ електроенергетичний процес охоплює розподіл, передачу та споживання електроенергії. Кожен етап супроводжується змінами параметрів, обумовленими відхиленням від номінального режиму, особливостями роботи силового обладнання, його технічним станом, діями обслуговуючого персоналу, впливом кліматичних умов та роботою систем захисту й автоматики.

Електромагнітна обстановка – це сукупність електромагнітних явищ, що виникають у середовищі під дією джерел завад і умов їх впливу. Вона визначається характеристиками джерел електромагнітних завад (ЕМЗ), параметрами їх випромінювання, особливостями електротехнічних засобів та комплексом заходів з забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС). Додатково на формування ЕМС впливають зовнішні фактори – кліматичні, механічні, виробничі тощо. Однією з основних характеристик електромагнітної обстановки є рівень ЕМС – така величина ЕМЗ, за якої з високою ймовірністю забезпечується нормальне функціонування технічних засобів, які одночасно є і джерелами, і споживачами завад.

Сфера електромагнітної сумісності в СТЕ охоплює широкий комплекс питань, основні з яких зводяться до:

- оцінювання рівнів ЕМС джерел завад і навантажень, а також визначення їх впливу на електрообладнання;

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- аналізу можливих економічних збитків від електромагнітних впливів;
- визначення рівнів ЕМЗ, які генерують нелінійні й швидкозмінні споживачі;
- прогнозування рівнів завад у різних вузлах системи;
- зменшення їх величин до нормованих рівнів відповідно до чинної нормативної документації.

Через сильний взаємозв'язок між джерелами завад у електричних мережах застосовують поняття рівнів сумісності. Це такі рівні завад, що забезпечують необхідну ЕМС у системі, враховуючи сумарний вплив усіх джерел. Вони лежать у діапазоні між максимумами щільності ймовірності значень завад і застосовуються як для оцінювання завадостійкості обладнання, так і для встановлення допустимих рівнів генерованих завад.

Показники якості електричної енергії (ПЯЕ) фактично є характеристиками ЕМС електричної мережі. Якщо ПЯЕ не перевищують допустимих рівнів, це гарантує нормальну роботу електротехнічних пристроїв. З іншого боку, кожен технічний засіб має власні допустимі рівні ЕМС, що визначають його завадостійкість. Очевидно, що ця завадостійкість має бути вищою, ніж фактичні значення ПЯЕ в мережі.

Проблема забезпечення якості електроенергії є однією з ключових складових сучасної електроенергетики. Від її вирішення залежить ефективність використання електроенергії, економічні показники роботи споживачів та режимна безпека енергосистеми. У СТЕ енергоефективність напряму пов'язана з виявленням причин нераціонального споживання електроенергії та оцінкою потенціалу енергозбереження. Застосування енергозберігаючих заходів у системах, що містять велику кількість нелінійних та нестаціонарних навантажень, вимагає забезпечення необхідних рівнів якості електроенергії та ЕМС. Погіршення якості напруги та струму призводить до порушення технологічних процесів, зростання активних і реактивних втрат, додаткового нагріву обладнання, зниження коефіцієнта потужності та скорочення ресурсу електротехнічних пристроїв. Основною причиною цих негативних наслідків є поширення кондуктив-

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

них завад через гальванічні зв'язки.

Якість електроенергії суттєво впливає на ефективність роботи електричних мереж та споживачів. У сучасних умовах проблема забезпечення ЯЕ загострюється через масове впровадження нових технологічних процесів, збільшення частки нелінійних, несиметричних і динамічних навантажень, а також поширення цифрових систем керування. В Україні ситуація ускладнюється низкою факторів: недостатньою пропускну здатністю мереж (особливо низьковольтних), застарілими принципами проектування, відсутністю сучасних засобів контролю ЯЕ та обмеженою кількістю технічних засобів для її поліпшення. Дослідження показують, що в багатьох випадках фактичні ПЯЕ не відповідають нормативним вимогам.

Нестационарні енергообмінні процеси у нелінійних колах СТЕ викликають численні негативні явища, які суттєво погіршують якість електроенергії. Оскільки навантаження у тягових мережах постійно змінюється, змінюються також рівень напруги, симетрія фаз і синусоїдальність сигналів. Через це показники якості електричної енергії також стають змінними, що ускладнює їх аналіз та прогнозування впливу на споживачів.

Оскільки основною причиною відхилень є падіння напруги в елементах електропостачання, то ці відхилення залежать не лише від величини навантаження, а й від параметрів мережі. Отже, параметри системи необхідно вибирати так, щоб забезпечити відповідність вимогам щодо якості електроенергії.

Особливо складною є ситуація для електрорухомого складу: споживана локомотивом потужність суттєво варіює залежно від профілю колії, маси поїзда, швидкості руху та режиму ведення. Крім того, постійно змінюється положення поїзда відносно тягової підстанції та кількість поїздів у зоні живлення. У разі аварійних або вимушених режимів із порушеною схемою живлення коливання напруги на струмоприймачі можуть бути значними.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Вплив відхилень напруги на роботу споживачів електроенергії

Одним із найпоширеніших типів навантаження в електроенергетичних системах є асинхронні та синхронні електродвигуни. Відхилення напруги на затискачах асинхронного двигуна (АД) призводять до зміни частоти обертання ротора, величини активних втрат, а також обсягу споживаної реактивної потужності (РП). Усі ці фактори безпосередньо впливають на економічні показники роботи двигуна, тобто на його ефективність та витрати електроенергії.

Втрата активної потужності в повністю завантажених асинхронних двигунах, що працюють із постійним моментом опору, збільшується при зниженні напруги. Це пояснюється тим, що двигун вимушений споживати більший струм для підтримання потрібного моменту. За підвищення напруги картина протилежна — втрати зменшуються. Проте в умовах малих навантажень характер залежності змінюється

У межах відхилень напруги $\pm 5\text{--}10\%$ від номінального активні втрати в АД змінюються незначно (не більше ніж на $0,03 R_{\text{ном}}$), але ці зміни є порівнянними з втратами у живильних мережах, що робить їх важливими для аналізу.

Вважається, що для двигунів серії А з потужністю $20\text{--}100$ кВт зміна напруги на 1% викликає зміну реактивної потужності приблизно на 3% . Зростання споживаної РП при підвищенні напруги зумовлене більшими витратами енергії на намагнічення сталі.

Зміна частоти обертання двигуна при відхиленнях напруги має аналогічний характер: підвищення напруги посилює електромагнітний зв'язок між статором і ротором, зменшує ковзання та збільшує частоту обертання; зниження напруги діє протилежно. Для механізмів із вентиляторним моментом опору (який пропорційний квадрату частоти обертання) це призводить і до зміни продуктивності машин.

Несиметрія напруги в трифазних мережах викликає додаткові втрати в елементах електричної мережі, спричиняє перегрів електрообладнання, прискорює

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

старіння його ізоляції та погіршує техніко-економічні показники роботи.

У машинах змінного струму за несиметрії напруги виникають додаткові магнітні поля, що обертаються не лише зі синхронною швидкістю, а й у протилежному напрямку з подвоєною синхронною частотою. Такі поля створюють гальмівний момент і додатковий нагрів ротора через появу струмів подвійної частоти.

Для асинхронних двигунів поширені значення коефіцієнта зворотної послідовності напруги K_2U становлять 0,05–0,06. У таких умовах зменшення обертового моменту незначне, але збільшення втрат і нагріву може суттєво скоротити строк служби двигуна. Наприклад, при $K_2U = 4 \%$ термін служби ізоляції може зменшитися удвічі.

У синхронних двигунах і генераторах несиметрія викликає додаткові втрати в статорі й роторі, появу вібрацій через знакозмінні моменти та тангенціальні сили з частотою, що у два рази перевищує частоту мережі. При значній несиметрії ці вібрації можуть бути небезпечними, особливо при дефектах конструкції.

Згідно з «Правилами технічної експлуатації електричних станцій і мереж», тривала робота турбогенераторів і СК допускається лише за умови, що різниця фазних струмів не перевищує 10 % від номіналу, а жоден із струмів не виходить за межі номінального значення. Для гідрогенераторів допускається різниця до 20 %.

Коливання напруги найчастіше виникають під час роботи різкозмінних навантажень: вентильних перетворювачів з великим діапазоном регулювання, електросталеплавильних печей, потужних зварювальних агрегатів тощо.

Такі коливання погіршують умови зорової роботи, спричиняють втому очей, знижують точність і продуктивність праці. Особливо чутливі до них лампи розжарювання. Газорозрядні лампи реагують значно менше. При $\Delta U > 10 \%$ можливе періодичне згасання газорозрядних ламп, а при $\Delta U > 15 \%$ — відключення магнітних пускачів. Також можуть виходити з ладу конденсатори та вентилі перетворювальних агрегатів.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У електролізних установках коливання напруги знижують продуктивність та пришвидшують знос анодів. У печах опору, що живляться від перетворювачів, нестабільність напруги спричиняє коливання струму та порушення режимів автоматичного регулювання температури.

Коливання фази і амплітуди напруги, що виникають через роботу прокатних станів, впливають на електромагнітний момент та потужності синхронних генераторів, що погіршує ефективність роботи станції. Спостерігалися випадки збоїв систем автоматичного регулювання збудження.

У контактних зварювальних машинах напруга впливає на якість шва. Дослідження показали, що допустимі коливання складають 3–5 %.

Коливання напруги також можуть спричинити вібрації електродвигунів, механічних конструкцій і трубопроводів. Наприклад, при коливаннях із частотою 1 Гц і амплітуді удвічі більшій за допустиму строк служби трубопроводів може скоротитися на 5–7 %.

Наявність вищих гармонік у нарузі мережі призводить до додаткових втрат у електричних машинах, трансформаторах і елементах мережі. Погіршується компенсація реактивної потужності, пришвидшується старіння ізоляції, порушуються режими роботи автоматизованих пристроїв та засобів зв'язку.

Для асинхронних двигунів несинусоїдальність напруги викликає зменшення коефіцієнта потужності та обертового моменту. Наприклад, якщо амплітуда 5-ї та 7-ї гармонік становить відповідно 20 % і 15 % від амплітуди основної гармоніки, коефіцієнт потужності знижується на 2,6 %. Моменти, створені гармоніками, зазвичай не перевищують частки відсотка основного моменту.

Суттєвіше гармоніки впливають на ізоляцію машин та конденсаторів. Спостворення форми напруги прискорює іонізаційні процеси в діелектрику, що спричиняє локальні дефекти, підвищення діелектричних втрат і зменшення строку служби.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

1.4 Якість електроенергії у мережах нетягових споживачів залізниць

На сучасному етапі розвитку електроенергетики значна частина електроенергії використовується споживачами у перетвореному вигляді. Однією з найбільших категорій таких споживачів є електрифікований залізничний транспорт. На залізницях України застосовуються системи тягового електропостачання (СТЕ) однофазного змінного струму номінальною напругою 25 кВ. На електровозах як основні силові перетворювальні пристрої використовуються випрямно-інверторні агрегати. Саме їх робота призводить до появи у тяговій мережі та у лініях електропередачі струмів і напруг із наявністю вищих гармонік.

- Ступінь спотворення кривих напруги та струму залежить від ряду факторів:

- місцезнаходження електровоза у межах міжпідстанційної зони;
- віддаленість від тягової підстанції;
- режим роботи електрорухомого складу;
- характер і величина навантаження на струмоприймачі.

Оскільки тягове навантаження має нелінійну, несиметричну та різко змінну природу, електромагнітні процеси в системі електропостачання набувають складного, багатофакторного характеру. Система електропостачання змінного струму на залізницях поєднує однофазні й двофазні навантаження, у результаті чого створюється несиметрія щодо обмоток тягового трансформатора та всієї трифазної енергосистеми. Така несиметрія, у тому числі напруги, передається до споживачів системи «два проводи – рейка» та до сторонніх (нетягових) споживачів, підключених до третинних обмоток тягових трансформаторів. У мережі живлення нетягових споживачів спостерігається «проникнення» несиметрії, що проявляється у різниці фазних напруг.

Випрямні агрегати електровозів, що мають нелінійні вольт-амперні характеристики, генерують у мережу вищі гармоніки струму. Ці гармонічні складові можуть частково надходити у зовнішні мережі та впливати на роботу споживачів.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

чів, не пов'язаних із тяговим навантаженням. Їх присутність спричиняє низку негативних ефектів:

- електромагнітна індукція створює перешкоди в дротяних лініях зв'язку;
- зростають активні й повні втрати у мережевому обладнанні;
- виникають додаткові втрати напруги, що поглиблює несиметрію та спотворює форму напруги у вузлах живлення;
- погіршення форми кривої напруги викликає додатковий нагрів синхронних та асинхронних електродвигунів, а також синхронних компенсаторів, що іноді вимагає збільшення їх встановленої потужності;
- зростання температурного навантаження на ізоляцію обмоток трансформаторів скорочує строк їх експлуатації;
- прискорюється теплове старіння ізоляції статорів асинхронних двигунів у мережах нетягових споживачів;
- збільшуються похибки вимірювання електроенергії, що може призвести до перевищення допустимих значень;
- можливий обрив нейтрального проводу через підвищений струм гармонік, кратних трьом, що спричиняє небезпечне перенапруження на окремих приймачах;
- виникають резонансні явища на частотах гармонік, що становлять загрозу для сучасного електрообладнання;
- загалом знижується надійність системи електропостачання нетягових споживачів.

Враховуючи зазначене, питання зменшення рівня гармонічних спотворень у мережах, розташованих поблизу тягових підстанцій, є надзвичайно актуальним.

Для оцінювання впливу цих процесів використовують поняття якості електроенергії. Якість електроенергії визначають як сукупність параметрів електричної енергії, що регламентовані стандартами та характеризують її придатність для нормальної роботи електроприймачів.

Несинусоїдні струми, як будь-які періодичні несинусоїдні сигнали, можуть

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

бути розкладені в ряд Фур'є, тобто подані у вигляді суми гармонічних складових із різною частотою. Протікаючи через елементи мережі, такі струми викликають додаткові падіння напруги, які, накладаючись на синусоїдальну основну напругу, формують спотворений її вигляд. Особливо значні відхилення фіксуються на струмоприймачах електровозів, що знаходяться на великій відстані від тягової підстанції. Таке спотворення знижує якість електроенергії та створює загрозу електромагнітної несумісності між електроприймачами і мережею.

Рівень несинусоїдності напруги характеризують два основні показники:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги;
- коефіцієнт n-ї гармоніки напруги.

Гармоніки напругою менше 0,1% допускається не враховувати.

Для мереж різного класу напруги встановлені нормально допустимі та гранично допустимі значення коефіцієнта спотворення. Ці дані наведено у таблиці 1.1.

Аналогічно, у таблиці 1.2 подано нормально допустимі значення коефіцієнтів окремих n-х гармонік, що визначаються в точках приєднання до мереж, залежно від номінальної напруги.

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти спотворення синусоїдальності напруги $K_u, \%$

Нормально допустимі значення при $U_{ном}, \text{кВ}$				Гранично допустимі значення при $U_{ном}, \text{кВ}$			
0,38	6...20	35	110...330	0,38	6...20	35	110...330
8,0	5,0	4,0	2,0	12,0	8,0	6,0	3,0

Таблиця 1.2 – Коефіцієнти n-ї гармонійної складової напруги $K_{u(n)}, \%$

Непарні гармоніки, не кратні 3 при $U_{ном}, \text{кВ}$					Непарні гармоніки, кратні 3 при $U_{ном}, \text{кВ}$					Парні гармоніки при $U_{ном}, \text{кВ}$				
n	0,38	6...20	35	110...330	n	0,38	6...20	35	110...330	n	0,38	6...20	35	110...330
5	6,0	4,0	3,0	1,5	3	5,0	3,0	3,0	1,5	2	2,0	1,5	1,0	0,5
7	5,0	3,0	2,5	1,0	9	1,5	1,0	1,0	0,4	4	1,0	0,7	0,5	0,3

Закінчення таблиці 1.2

Непарні гармоніки, не кратні 3 при $U_{ном}$,кВ					Непарні гармоніки, кратні 3 при $U_{ном}$,кВ					Парні гармоніки при $U_{ном}$, кВ				
n	0,38	6...20	35	110...330	n	0,38	6...20	35	110...330	n	0,38	6...20	35	110...330
11	3,5	2,0	2,0	1,0	15	0,3	0,3	0,3	0,2	6	0,5	0,3	0,3	0,2
13	3,0	2,0	1,5	0,7	21	0,2	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,3	0,3	0,2
17	2,0	1,5	1,0	0,5						10	0,5	0,3	0,3	0,2

1.5 Способи підвищення якості електроенергії

У системах тягового електропостачання залізниць змінного струму вже з перших етапів їхнього впровадження застосовували низку технічних рішень, спрямованих на покращення якості електроенергії та зменшення негативного впливу тягового навантаження на енергосистему. Традиційно основними заходами стали два підходи:

- Підключення тягових підстанцій до живильної лінії електропередач за так званим принципом «гвинта».
- Встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності у відстаючу фазу тягової підстанції [28].
- Підключення за правилом «гвинта»

Застосування схеми «гвинтового» підключення дає змогу зменшити вплив несиметричного навантаження на систему зовнішнього електропостачання. Суть цього принципу полягає у почерговому приєднанні найменш навантаженої фази тягового трансформатора до різних фаз трифазної лінії живлення. Такий підхід дає можливість:

- рівномірніше розподілити навантаження між фазами,
- забезпечити узгоджену паралельну роботу сусідніх підстанцій завдяки правильному підключенню відстаючої та випереджаючої фаз.
- знизити струми зворотної послідовності у зовнішній мережі.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ					Арк.
										24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

Найбільший позитивний ефект від використання цього методу досягається тоді, коли групу утворюють шість тягових підстанцій і навантаження по лівому та правому плечу є однаковим. Однак у практичних умовах експлуатації досягти такої симетрії майже неможливо, оскільки відстані між підстанціями різні, а навантаження постійно змінюється. Це призводить до зростання несиметрії напруги у зовнішній мережі.

Компенсація реактивної потужності у відстаючій фазі

Для зменшення струмів зворотної послідовності та симетрування режимів роботи тягових підстанцій широко використовують однофазні пристрої компенсації реактивної потужності, які вмикають у відстаючу фазу. У разі рівномірного навантаження лівого та правого плечей підстанції такі пристрої забезпечують максимальну ефективність симетрування струмів та часткове згладжування впливу несиметричних тягових навантажень.

Застосування фільтрів і їх обмеження

Пристрої поперечної компенсації можуть одночасно виконувати роль фільтрів вищих гармонік, проте при цьому зменшується їхня ефективність як джерел реактивної потужності. Причини цього такі:

- частина реактивної енергії витрачається у реакторах фільтрів,
- конденсатори повинні працювати з обмеженнями по струму основної частоти, щоб уникнути перевантаження через гармоніки.

У результаті фільтрокомпенсуючі установки не завжди можуть забезпечити одночасно якісне згладжування гармонік і ефективну компенсацію реактивної потужності.

Основні показники якості електроенергії

У роботі [28] підкреслюється, що для тягових мереж змінного струму найважливішими є три показники якості електричної енергії:

- коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю;
- коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги;
- коефіцієнт n-ї гармонійної складової.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Саме ці параметри найсильніше погіршуються через специфічний характер тягового навантаження, яке є однофазним, динамічним і нелінійним.

1.6 Класифікація засобів покращення якості електроенергії

Усі відомі способи підвищення якості електроенергії в умовах залізничного електропостачання можна поділити на дві великі групи:

Ті, що передбачають зміну принципів схем живлення тягової мережі.

До них відносять різні варіанти підключення підстанцій, зміни структури мереж, використання інших типів трансформаторів та схем фазування.

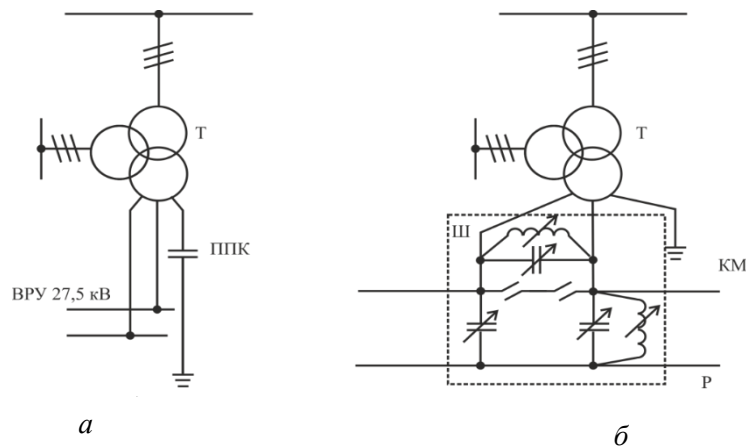
Ті, що ґрунтуються на перетворенні та подальшій компенсації неякісної енергії.

Задача підвищення ефективності передачі електроенергії в лініях ДПР частково вирішується одночасно з проблемою підвищення якості електроенергії на шинах розподільчого пристрою тягової підстанції 27,5 кВ, за рахунок регулювання напруги бустер-трансформаторами, пристроями ємнісної компенсації, або іншим обладнанням. Наприклад, в пропонується включення пристрою поздовжньої компенсації реактивної потужності на тяговій підстанції в рейковий фідер (рис. а): у результаті покращується режим напруги в лініях, що живлять пристрої СЦБ, в лініях нетягових споживачів ДПР 27,5 кВ, а також у колах власних потреб тягової підстанції. Автори пропонують використовувати пристрій симетрування тягового навантаження за схемою Штейнметца (рис. 1.1), перевагою якого є можливість окремо симетрувати струм правого та лівого плеча живлення тягової мережі.

Запропоновані рішення впливають на стан якості електричної енергії на тягових шинах підстанції, що позитивно позначаються на якості електропостачання нетягових споживачів, але не усувають визначених вище недоліків системи ДПР, зокрема, проблему із забезпеченням двостороннього живлення. Вирішення цієї проблеми теоретично можливе через досягнення повного симетрування тягового навантаження, що потребує комплексної модернізації всіх підс-

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

танцій, встановлення нового потужного обладнання та розробки програмного забезпечення для динамічного управління параметрами симетруючого пристрою. Проте, у цьому контексті питання живлення нетягових споживачів, із потужністю меншої у 5-7 разів проти потужності тягового навантаження, не є основним. Тому доцільніше розглянути способи, направлені виключно на підвищення ефективності передачі електричної енергії лініями ДПР.



Т – головний понижуючий трансформатор; ВРУ – відкрита розподільча установка; КМ – контактна мережа; Р – рейка; Ш – пристрій симетрування за схемою Штейнметца

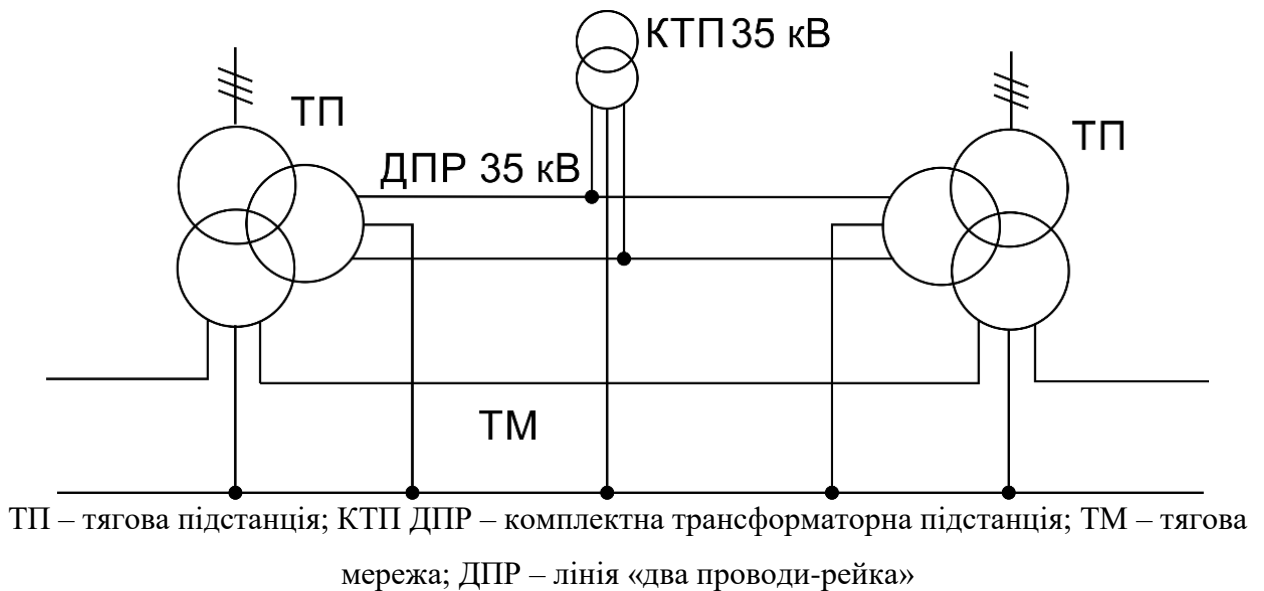
Рисунок 1.1 – Схема включення пристрою поздовжньої компенсації (ППК) (а) та пристрою симетрування навантаження (б)

Відомий спосіб забезпечення двостороннього живлення ліній електропостачання полягає у переведенні лінії ДПР на живлення від третьої (додаткової) обмотки тягового трансформатора з номінальною напругою 35 кВ та схемою з'єднання фаз у «зірку» (рис. 1.2).

Недоліком цього способу є необхідність проведення реконструкції існуючих ліній ДПР та заміни понижуючих трансформаторів нетягових споживачів, що пов'язано із підвищенням ступеня напруги передачі електроенергії. Крім того, наявність третьої обмотки трансформатора тягової підстанції не є обов'язковою або її номінальна напруга може відрізнятись від напруги третьої обмотки на суміжній підстанції, що в такому разі потребуватиме заміни обладнання підста-

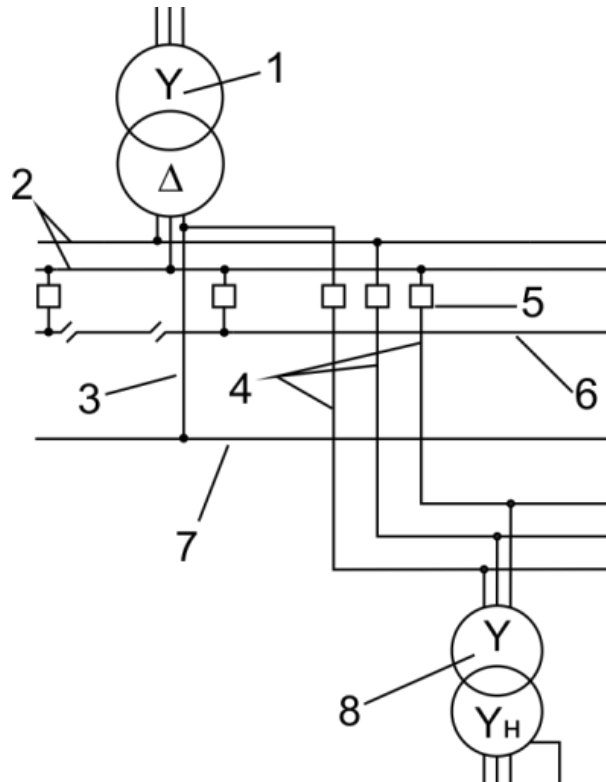
нції.

Інша пропозиція полягає у відмові від використання рейкової колії та прокладанні третього фазного проводу на опорах контактної мережі (рис. 1.3). Відповідно ввід до КТП ДПР, підключений до рейок, приєднують на додатковий провід. При реалізації цього способу із нетягової мережі відводиться струм електрорухомого складу, що викликає несиметричне завантаження фаз лінії ДПР та несинусоїдний спад напруги у системі рейка-земля, вирівнюються параметри лінії, а електромагнітний вплив тягової мережі стає рівнозначним. Індукована електрорушійна сила $\underline{E}_{ка}$, $\underline{E}_{кв}$, $\underline{E}_{ка}$ (рис.) змінює значення напруги у кожній фазі відносно землі однаково, а система векторів лінійних напруг \underline{U}_{ac} , \underline{U}_{ba} , \underline{U}_{cb} , у такому випадку, залишається симетричною.



ТП – тягова підстанція; КТП ДПР – комплектна трансформаторна підстанція; ТМ – тягова мережа; ДПР – лінія «два проводу-рейка»

Рисунок 1.2 – Схема живлення нетягових споживачів від ДПР 35 кВ



- 1 – тяговий трансформатор; 2 – шини; 3 – рейковий фідер;
 4 – проводи ЛЗФ-27,5 кВ 5 – вимикач 6 – контактна мережа; 7 – рейка;
 8 – трансформатор КТП

Рисунок 1.3 – Схема підключення ЛЗФ-27,5 кВ до шин тягової підстанції

На рис. пунктиром показано систему векторів напруги на шинах підстанції та індуковану струмом електрорушійну силу у фазах трипровідної лінії нетягового електропостачання, суцільною – їх суперпозицію.

Модернізовану лінію нетягового електропостачання автори називають лінією з заземленою фазою (ЛЗФ), оскільки вона гальванічно зв'язана із рейкою через обмотку трансформатора. Це рішення дозволяє зменшити несиметрію та несинусоїдність напруги у споживачів за зменшення електромагнітного впливу та гальванічного впливу тягової мережі на трифазну лінію.

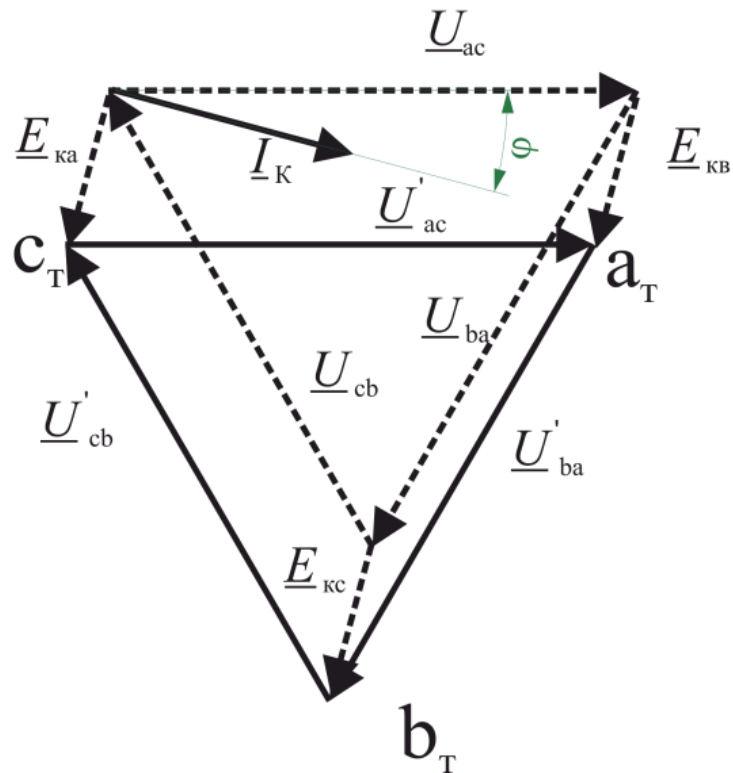
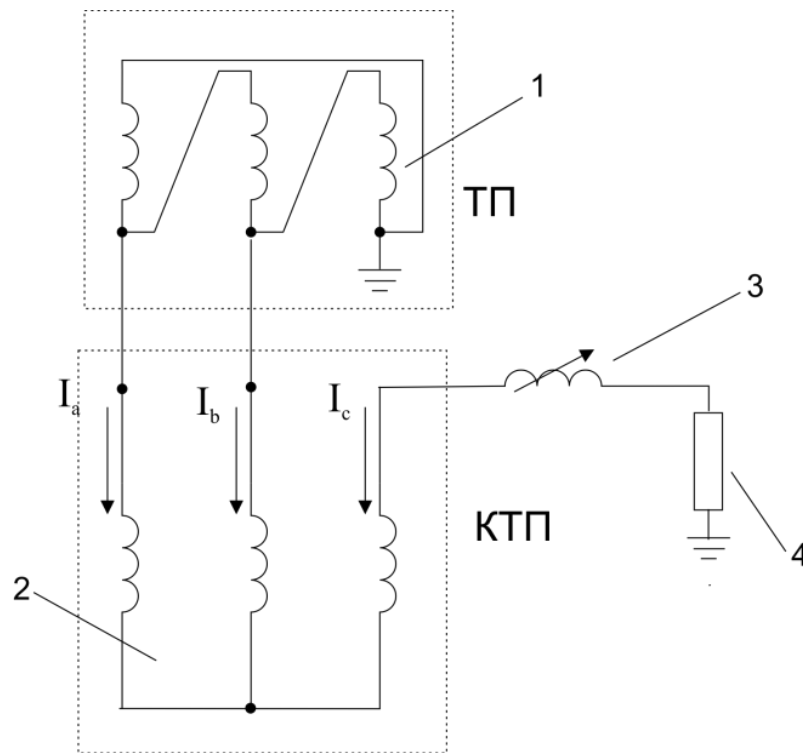


Рисунок 1.4 – Векторна діаграма напруги у лінії ЛЗФ-27,5 кВ

Інше технічне рішення запропоноване у передбачає від'єднання фази трансформатора КТП-25 кВ від рейки та підключення її до заземлювача з регульованим індуктивним елементом (рис. 1.4).

Суть підходу полягає у тому, що спад напруги від протікання струму навантаження у землі, індуктивності та заземлювачі зрівнюють із спадом напруги у проводах. У результаті досягається зниження до допустимого рівня несиметрії струму та напруги у місці приєднання КТП ДПР.



1 – вторинна обмотка тягового трансформатора; 2 – первинна обмотка трансформатора КТП;
3 – регульована індуктивність; 4 – штучний заземлювач

Рисунок 1.5 – Схема електропостачання нетягових споживачів змінного струму із вдосконаленим заземлювачем КТП

Недоліком цього рішення є те, що залишається спільний контур для протікання струму електрорухомого складу та нетягового навантаження, а отже наслідки від гальванічного впливу зберігаються. Крім того фази лінії нетягового електропостачання у цьому разі продовжують бути рознесеними у просторі, що обумовлює несиметрію напруги від магнітного впливу тягової мережі.

Третій спосіб, де у якості рішення проблем використовується додатковий трансформатор, приєднаний до районної обмотки тягового трансформатора підстанції. Вторинна обмотка додаткового трансформатора напругою 27,5 кВ живить трипровідну трифазну лінію, яка замінила лінію ДПР.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЗМІННОГО СТРУМУ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

2.1 Оцінка несинусоїдності струмів за допомогою активних та обмінних характеристик електротягового навантаження

У системах тягового електропостачання змінного струму істотний вплив на режими роботи мережі справляють гармонійні складові тягового струму. Їх поява спричиняє спотворення синусоїдальної форми напруги на струмоприймачах електрорухомого складу (ЕРС), що призводить до погіршення умов його роботи, збільшення втрат активної потужності та додаткових падінь напруги в елементах тягової мережі. Окрім цього, присутність гармонік може викликати резонансні явища як у системі тягового електропостачання, так і у зовнішніх мережах живлення.

Характеристики гармонійних складових і їх кількісний склад досліджувалися у багатьох наукових роботах, проте практичне застосування цих даних стикається з низкою труднощів. Зокрема, у нормативних документах наводяться усереднені значення гармонік тягового струму в режимах тяги та рекуперації, однак значна ширина діапазону їх зміни ускладнює коректне використання цих даних у розрахунках. Крім того, відсутність відомостей про фазовий склад гармонійних компонент струму унеможливорює точне визначення втрат напруги, спричинених несинусоїдністю.

Необхідність формування цифрової моделі ЕРС

Для підвищення точності розрахунків режимів тягового електропостачання необхідно застосовувати цифрові моделі, що враховують реальні характеристики електрорухомого складу та формують спектр гармонік тягового струму. У такій моделі всі гармонічні складові, притаманні ЕРС, враховуються одночасно, включно з їх взаємним впливом.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У наукових джерелах описано різні підходи до побудови моделей ЕРС, переважно на основі аналітичних виразів для однофазних випрямлячів. Проте результати експериментальних досліджень часто демонструють відмінності між реальною формою тягового струму та розрахунковими залежностями, що може призвести до значних похибок у моделюванні режимів системи електропостачання.

Фактична форма тягового струму визначається кількома факторами, основними з яких є:

Тип електрорухомого складу та режими його роботи. Переважна кількість ЕРС українських залізниць оснащена колекторними двигунами та випрямними установками, що формують виражений гармонічний спектр. На окремих електровозах з рекуперацією застосовується тиристорне керування, яке також значно впливає на форму струму.

Наявність магістральних ділянок та великих станцій у зоні живлення тягової підстанції, що визначають режимні особливості роботи кількох електровозів з різними кутами комутації.

Резонансні явища у системах зовнішнього електропостачання, які переважно проявляються на 5-й та 7-й гармоніках.

Склад гармонік вирівнювальних струмів, що можуть додатково деформувати криву тягового струму.

Усе це зумовлює розходження між теоретичними розрахунками гармонік та їх реальними значеннями.

Принципи побудови моделі тягового навантаження

Враховуючи зазначені особливості, запропонований підхід до формування моделі тягового навантаження передбачає такі положення:

На діючих електрифікованих ділянках побудова моделі струму повинна ґрунтуватися на експериментально вимірній формі тягового струму. Тип ЕРС або конкретні режими його роботи при цьому не є визначальними, оскільки модель враховує фактичний сумарний вплив усіх електровозів у зоні живлення.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Для проєктованих ділянок модель має базуватися на даних, отриманих шляхом експериментальних вимірювань на аналогічних ділянках. У разі відсутності таких даних доцільно застосовувати узагальнені характеристики гармонічного складу тягового струму, наведені у відповідних дослідженнях.

Рекомендована послідовність розрахунків

Для комплексного аналізу режимів тягового електропостачання з урахуванням несинусоїдності пропонується така методика:

Створення моделі тягового навантаження на основі експериментально визначених гармонічних складових.

Формування цифрової моделі системи тягового електропостачання, в якій гармонічний склад струму ЕРС інтегрується у всі розрахунки.

Моделювання сталих та перехідних процесів у системах зовнішнього електропостачання в заданих режимах.

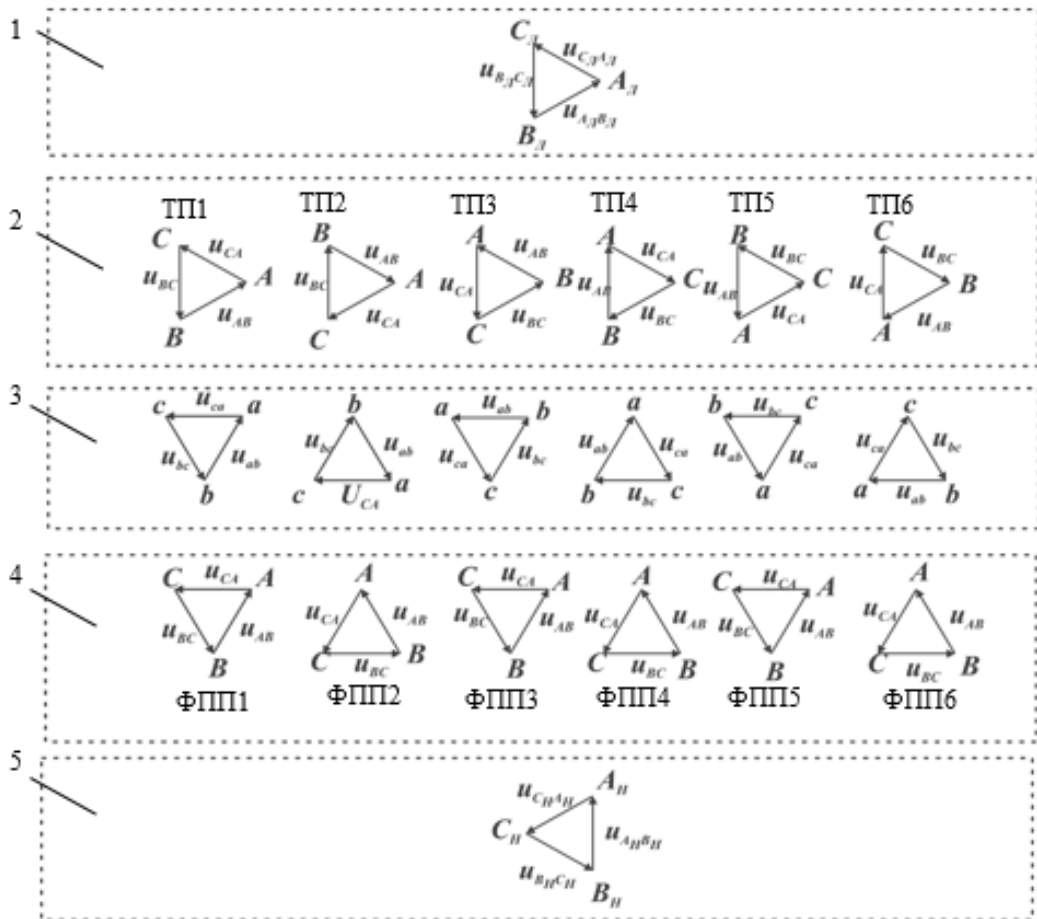
Оцінювання показників якості електричної енергії за результатами моделювання, включаючи визначення коефіцієнтів гармонійних складових окремих порядків і сумарного коефіцієнта спотворення, та зіставлення їх з нормативними вимогами.

2.2 Дослідження несиметрії в системах електричної тяги методом фазних координат

Дослідження несиметрії в системах електричної тяги методом фазних координат показало, що для забезпечення стабільного двостороннього живлення нетягових споживачів від шин підстанцій 27,5 кВ необхідно гарантувати формування наперед заданої конфігурації системи векторів напруги на виході фазопоротного пристрою (ФПП), незалежно від того, яку саме систему вхідних векторів напруги він отримує від живильної мережі. Результати виконаних досліджень засвідчили технічну можливість реалізації цього підходу за умови застосування трифазного трансформатора, конструкція якого дає змогу встановлю-

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

шість характерних варіантів приєднання підстанцій до зовнішньої мережі та відповідні схеми підключення ФПП до тягових шин, що дозволяє сформувати однакову систему векторів для гарантованого двостороннього живлення трифазної мережі нетягових споживачів.



1 – вектори лінійної напруги лінії електропостачання; 2, 3 – вектори напруги на первинних та на вторинних обмотках тягових трансформаторів; 4 – вектори первинної обмотки ФПП; 5 – векторна діаграма напруги у лінії нетягового електропостачання

Рисунок 2.2– Векторні діаграми напруг системи електропостачання із ФПП

Векторні діаграми на рисунку 2.2 демонструють зміну систем лінійних напруг у разі чергування фаз тягового трансформатора та використання ФПП. При зміні послідовності приєднання введів підстанції до живильної мережі відповідно змінюється і послідовність обертання лінійних напруг на первинних

обмотках трансформаторів. Це призводить до того, що колінеарні вектори у трикутниках напруг високої обмотки сусідніх підстанцій опиняються у протифазі, формуючи дзеркально симетричні конфігурації системи векторів. Таким чином, використання ФПП забезпечує можливість одержати наперед визначену структуру векторів вихідної напруги незалежно від вхідних умов.

Суть методу забезпечення двостороннього живлення із застосуванням ФПП зведено у таблицю 2.1, у якій враховано як схеми з'єднання обмоток тягових трансформаторів (першої або одинадцятої групи), так і схеми підключення підстанцій до системи зовнішнього електропостачання.

Користуючись даними таблиці, можна коректно обрати необхідну групу ФПП та визначити доцільний варіант приєднання його виводів до шин підстанції. Наприклад, якщо обмотки тягового трансформатора з'єднані за схемою «зірка–трикутник» одинадцятої векторної групи, а його вводи приєднані до зовнішньої мережі згідно зі схемою №2 (таблиця 2.1, колонка 2), то ФПП має працювати зі схемою У/Д-1. У цьому випадку вивід фази а тягової обмотки трансформатора необхідно приєднати до виводу В ФПП, а виводи фаз b і c — відповідно до виводів, позначених як ТП2 та ФПП2. Аналогічно, для підстанції з тяговим трансформатором першої групи, який підключається до мережі за схемою №3 (табл. 2.1, колонка 2), застосовується ФПП групи У/Д-11, причому вивід а вторинної обмотки трансформатора слід з'єднати з виводом С первинної обмотки ФПП, вивід b — з виводом А, а вивід c — з виводом В. Слід підкреслити, що для кожного непарного варіанта схеми підключення первинної обмотки трансформатора до зовнішньої мережі існує лише один можливий варіант правильного приєднання ФПП.

Розрахункова схема системи електропостачання залізниці з приєднаними до тягових шин підстанцій фазоповоротними пристроями та трипровідною лінією нетягового електропостачання наведена на рисунку 2.3. На ній представлено ділянку Осикувата — Сугоклея, що забезпечує живлення нетягового споживача через ФПП та трипровідну мережу. У схемі позначено: С1 і С2 — електроенер-

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

гетичні системи; 1 — система зовнішнього електропостачання; 2 — тягові підстанції (ТП1, ТП2, ТП3); 3 — тягова мережа та еквівалентні тягові навантаження (ЕРС1, ЕРС2); 4 — трипровідна лінія; ФПП1, ФПП2, ФПП3 — фазоповоротні пристрої; Н1, Н2, Н3 — еквівалентні нетягові навантаження.

Таблиця 2.1 – Вибір схеми та групи фазоповоротного пристрою

Номер схеми підключення	Схема підключення первинної обмотки тягового трансформатора до зовнішньої мережі	Група з'єднання обмоток тягового трансформатора	Відповідність виводів тягової обмотки трансформатора до виводів первинної обмотки ФПП (вивід вторинної обмотки тягового трансформатора / вивід первинної обмотки ФПП)			Група з'єднання обмоток ФПП
			a/A	b/B	c/C	
1		11 та 1	a/A	b/B	c/C	11
2		11	a/B	b/A	c/C	1
		1	a/A	b/C	c/B	
3		11 та 1	a/C	b/A	c/B	11
4		11	a/A	b/C	c/B	1
		1	a/C	b/B	c/A	
5		11 та 1	a/B	b/C	c/A	11
6		11	a/C	b/B	c/A	1
		1	a/B	b/A	c/C	

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ

Арк.

38

Параметри ФПП прийняті відповідно до технічних вимог до силових трансформаторів, що визначають їхні номінальні потужності, струми холостого ходу, а також потужності й напруги короткого замикання для трансформаторів з напругою високої обмотки 35 кВ та номінальною потужністю 2500 кВА. Потужність ФПП вибиралася з урахуванням потужності еквівалентного споживача та коефіцієнта запасу 1,5, що забезпечує стійку роботу пристрою за вимушених режимів. Для масляного трансформатора використовувались значення струму холостого ходу 5 кВт і напруги короткого замикання 1,2 %, а також потужності короткого замикання 25 кВт і відповідної напруги 10 %.

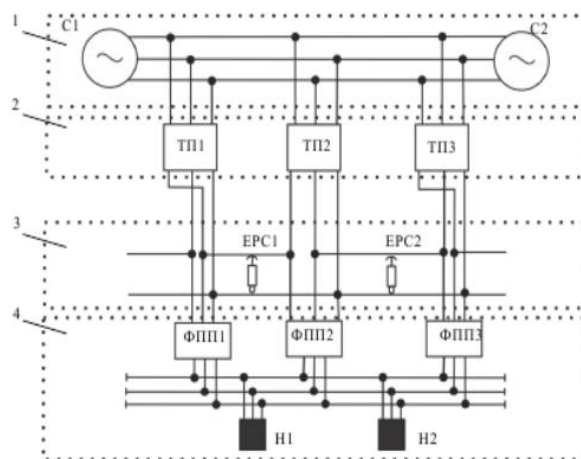


Рисунок 2.3 - Система електропостачання ділянки залізниці Помічна - Осикувата - Сутоклея із живленням нетягового споживача через фазоповоротний пристрій та трипровідну лінію

Результати моделювання системи електропостачання, представленої на рисунку 2.3, подані у вигляді осцилограм струмів електроенергетичної системи та нетягового споживача (рисунки 2.4 і 2.5). Частки вищих гармонік у напрузі, що подається до підстанцій та споживачів, наведено на рисунках 2.6 і 2.7, що дозволяє оцінити рівень спотворень та вплив роботи ФПП на симетричність і якість електроенергії в системі.

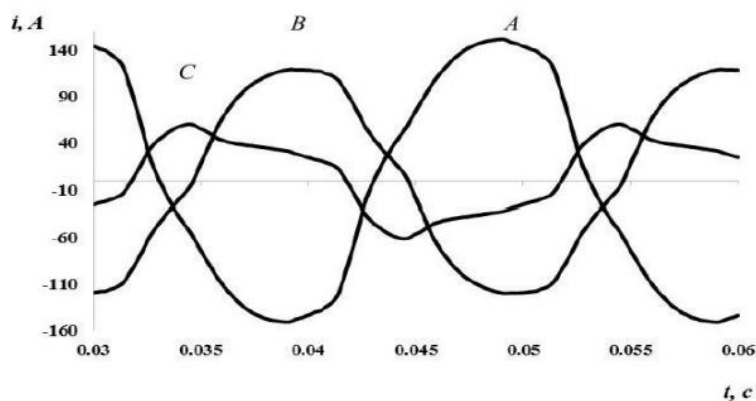


Рисунок 2.4 – Осцилограми сумарних первинних струмів підстанцій приведені до електроенергетичної системи С1 при живленні нетягового споживача через фазоповоротний пристрій та трипровідну лінію

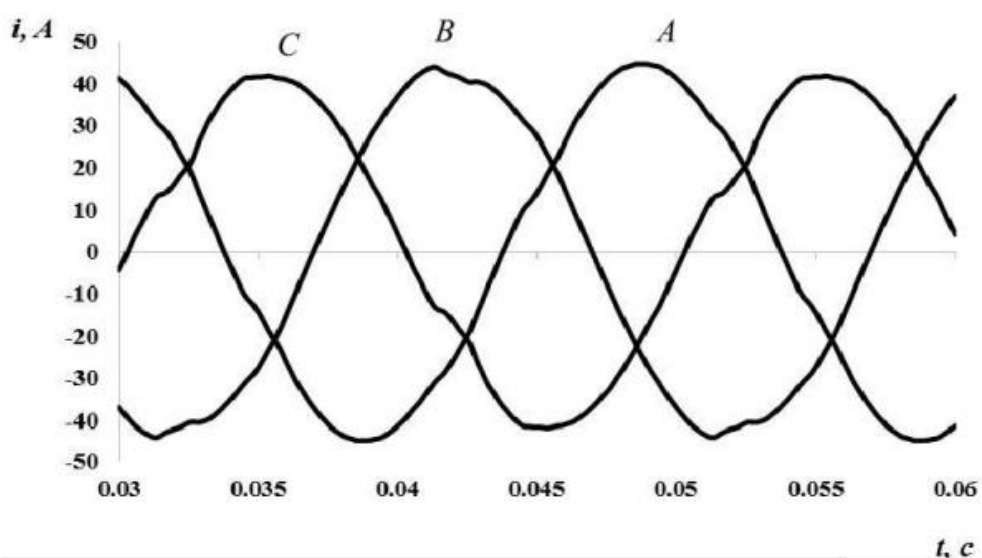


Рисунок 2.5 - Осцилограми струмів нетягового споживача, що отримує живлення від трипровідної лінії та фазоповоротного пристрою

2.3 Опис програмного комплексу «Інтелектуальна система електропостачання транспорту «iSET»

Програмний комплекс «Інтелектуальна система електропостачання транспорту «iSET» розроблений в Українському державному університеті науки і технологій. Його основним призначенням є розрахунок режимних параметрів

систем тягового електропостачання залізниць постійного та змінного струму. За допомогою комплексу виконуються визначення фідерних і первинних струмів, розподіл струмів у контактній мережі, розрахунок втрат напруги, потужності, витрат електроенергії, а також аналіз основних показників якості електроенергії з урахуванням дії технічних засобів їх покращення. Програма також дозволяє виконувати оптимізаційні розрахунки параметрів системи та формувати закони управління елементами для підвищення ефективності роботи тягової мережі.

Для відображення структури та фізичної організації програми було використано діаграму компонентів UML (рисунок 2.6). Вона демонструє архітектуру системи та взаємозв'язки між її складовими. На рисунку 2.7 наведена структура основного інтерфейсу, де відображено ключові класи компонент.

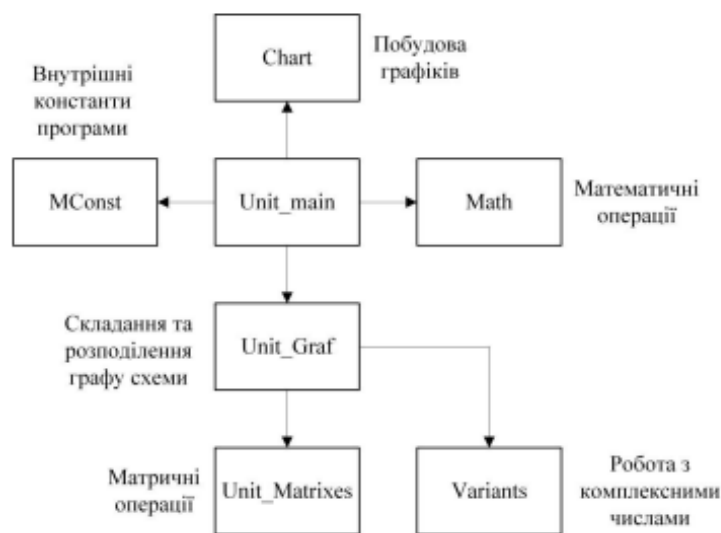


Рисунок 2.6 - Діаграма компонентів

Після запуску виконуваного файлу з'являється головне вікно програми «iSET». Інтерфейс поділений на функціональні панелі, що забезпечує зручний доступ до вводу даних, вибору режимів оптимізації та перегляду результатів.

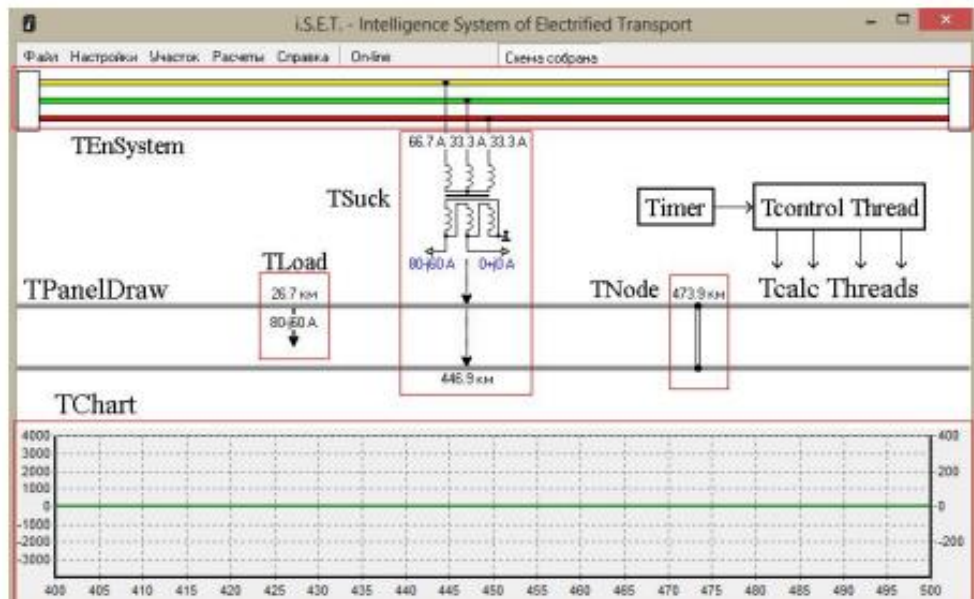


Рисунок 2.7 - Структура інтерфейсу програми з основними класами

Панель «Ділянка» використовується для введення основних характеристик ділянки моделювання: довжини, роду струму, питомого опору контактної мережі. Для ділянок змінного струму додатково задається взаємний опір. Після змін у вихідних даних натискається кнопка «Застосувати».

На окремій панелі виконується розміщення тягових підстанцій. Користувач повинен:

Після появи підстанції на робочому полі її можна переміщувати вздовж ділянки за допомогою миші (рисунок 2.8).

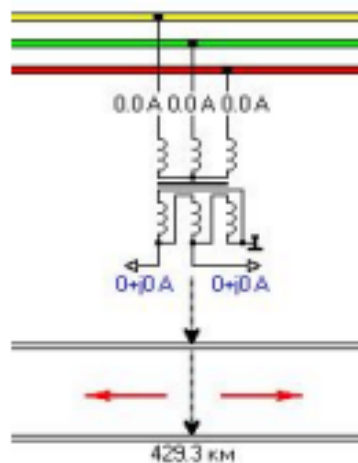


Рисунок 2.8 – Розташування тягової підстанції в робочій області програми

Після завершення розміщення об'єктів натискається кнопка «Собрать схему» (рисунок 2.9). Програма автоматично формує граф схеми, визначає кількість незалежних контурів, глибину та загальну кількість елементів. На екрані виводяться проміжні статуси — «поиск», «фильтрация», після чого — «готово». Далі здійснюється розрахунок напруги холостого ходу, струмів плечей живлення та фазних струмів у зовнішній системі.

Після натискання кнопки «Добавить» формується остаточна схема розрахунку (рисунок 2.10).

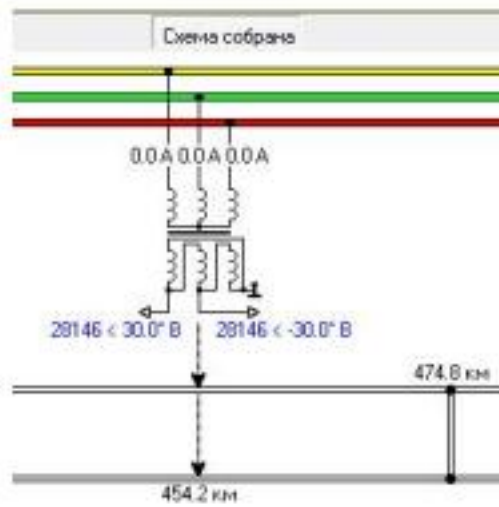


Рисунок 2.9 - Збирання розрахункової схеми

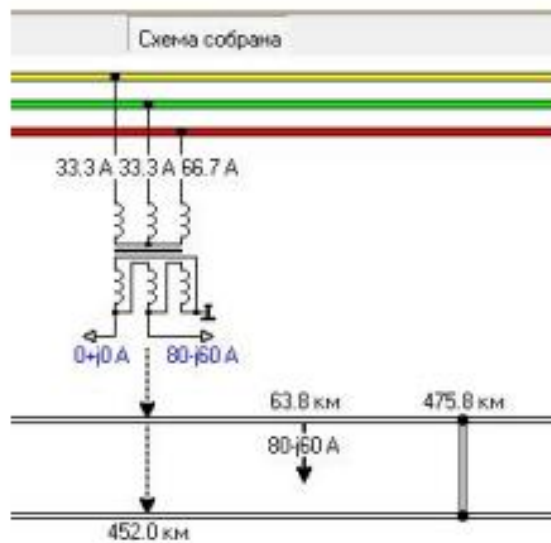


Рисунок 2.10 - Остаточна схема розрахунку дослідження якості електроенергії у споживачів, підключених до електричної мережі залізниці

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СПОЖИВАЧА

3.1 Режими роботи системи електропостачання залізниці

У цьому розділі наведено результати експериментального дослідження показників якості електричної енергії у споживача, який отримує живлення від системи електропостачання залізниці змінного струму. Метою дослідження є оцінювання впливу режимів роботи тягової мережі та руху поїздів на електроенергетичні параметри нетягового навантаження.

У першому періоді дослідження було використано схему, зображену на рисунку 3.1. На цій схемі представлена система електропостачання змінного струму, в якій від високовольтної мережі через трьохобмотковий трансформатор здійснюється живлення електрифікованої залізничної ділянки. Від тієї ж трансформаторної підстанції живиться і нетяговий споживач, що дозволяє оцінити взаємний вплив режимів роботи тягової та нетягової частини системи.

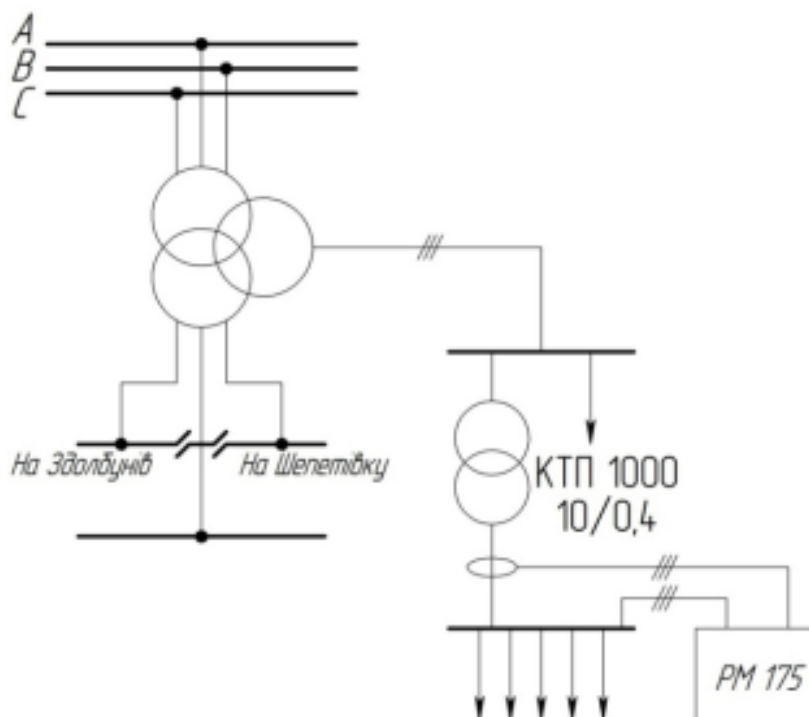


Рисунок 3.1 - Схема проведення вимірювань

У другому періоді дослідження було змінено умови експерименту. На рису-

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

робничих ділянок та підприємства в цілому, при цьому реактивна потужність джерел не враховується. Результати першого етапу застосовуються для вибору потужності трансформаторів і визначення необхідної компенсації реактивної потужності. На другому етапі навантаження перераховують з урахуванням встановлених компенсуючих пристроїв та можливості роботи синхронних двигунів у режимах компенсації реактивної потужності.

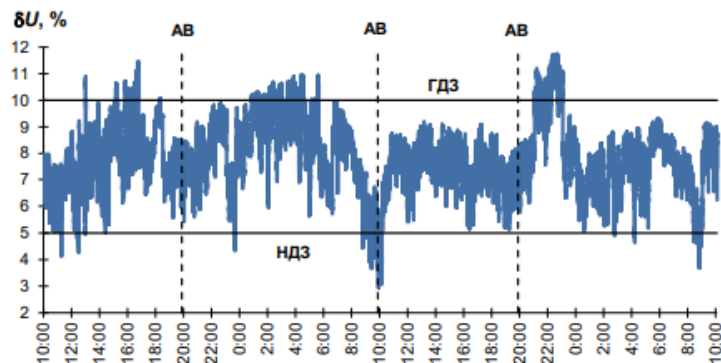


Рисунок 3.3 - Усталене відхилення напруги

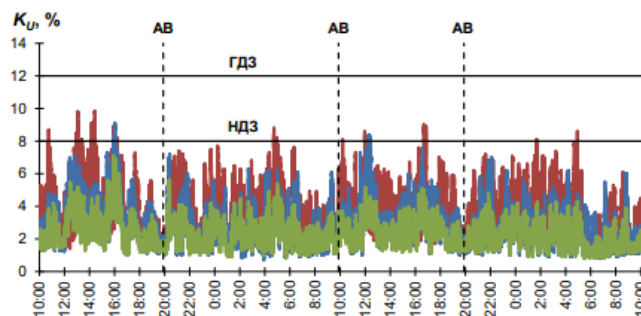


Рисунок 3.5 - Коефіцієнти спотворення синусоїдності напруги

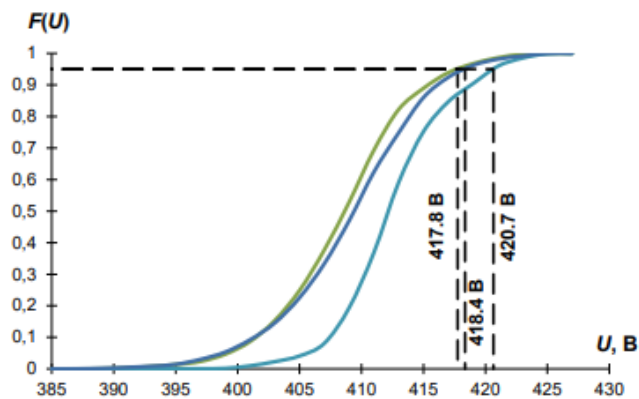


Рисунок 3.6 - Інтегральні функції розподілу напруги та значення з імовірністю

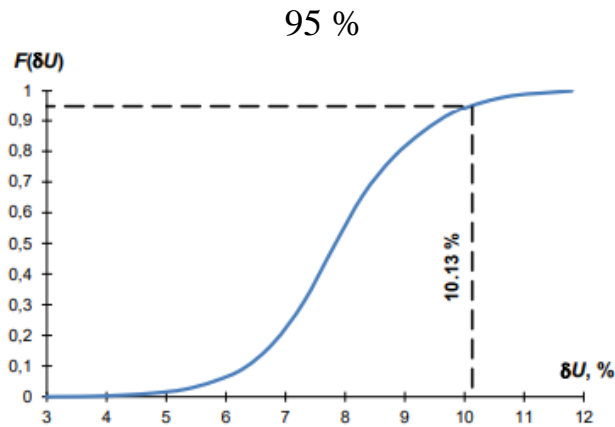


Рисунок 3.7 - Інтегральна функція розподілу усталеного відхилення напруги та значення з імовірністю 95 %

Після проведення експериментальних вимірювань здійснювалась обробка та аналіз отриманих даних. Узагальнені показники якості електричної енергії наведено в таблиці 3.1. Особливу увагу під час аналізу було приділено аварійним відключенням автоматики частотного перетворювача споживача. Як показали результати, такі відключення мали чітко виражений періодичний характер і збігались у часі з проходженням швидкісних поїздів по фідерній зоні, що живиться від тягової підстанції ПС Славута-тягова (таблиця 3.2). Для прикладу:

- аварія 15.12.2015 о 19:49 співпала з рухом поїзда №742 (743);
- аварія 16.12.2015 о 09:52 – з рухом поїзда №741;
- аварія 16.12.2015 о 19:49 – з рухом поїзда №742 (743).

На зазначеній ділянці залізниці використовується консольно-петлева схема контактної мережі, яка вважається штатною для даного району. Пристрій компенсації реактивної потужності на ПС Славута-тягова під час вимірювань знаходився у непрацездатному стані, що впливало на загальний рівень спотворень у мережі.

У періоди проходження поїздів, наведені у таблиці 3.3, було зафіксовано так звані «пилоподібні» спотворення форми кривої напруги. Їх виникнення обумовлене зміною навантаження та реактивного обміну між тяговими трансформаторами і контактною мережею при переміщенні поїздів фідерною зоною. Три-

валість спотворень відповідала часу ходу поїздів:

- 15.12.2015 – 11 хв 40 с;
- 16.12.2015 – 7 хв 20 с; 8 хв 21 с; 22 хв 20 с (два поїзди); 17 хв 20 с.

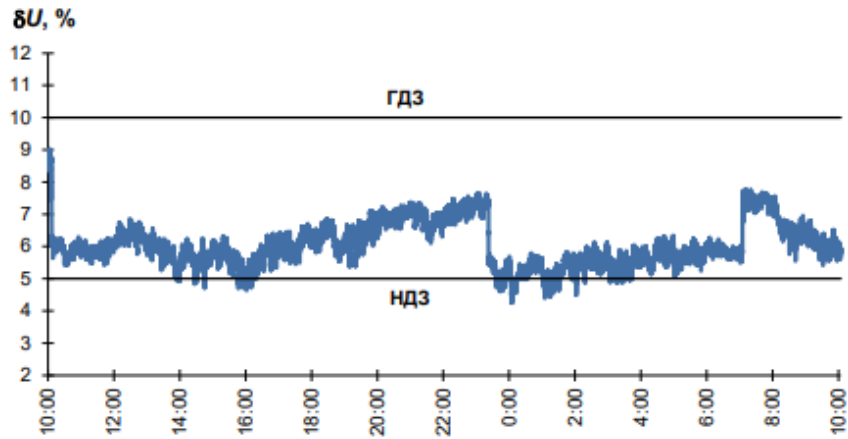


Рисунок 3.9 - Усталене відхилення напруги

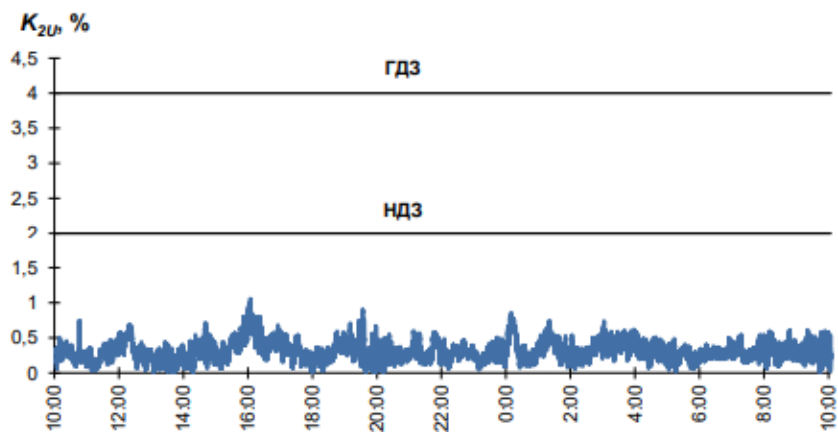


Рисунок 3.10 - Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю

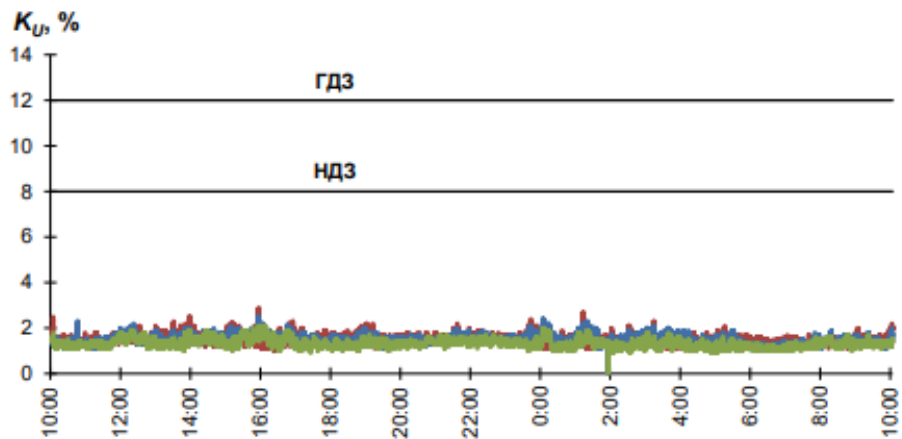


Рисунок 3.11 - Коефіцієнти спотворення синусоїдності напруги

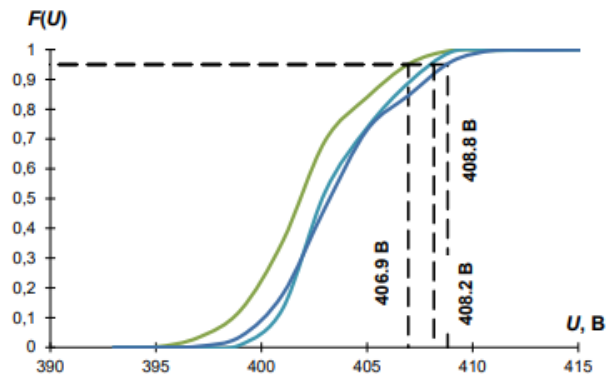


Рисунок 3.12 - Інтегральні функції розподілу напруги та значення з імовірністю 95 %

Таким чином, результати досліджень свідчать про істотний вплив руху поїздів на якість електричної енергії нетягових споживачів, що підключені до тієї ж системи електропостачання. Зафіксовані відключення автоматики та характерні спотворення синусоїдної форми напруги підтверджують необхідність модернізації системи компенсації реактивної потужності, а також удосконалення структури живлення споживачів для зниження негативного впливу тягової мережі.

ВИСНОВКИ

Проаналізувавши результати проведених вимірювань та отримані дані щодо показників якості електричної енергії у тяговій мережі, можна сформулювати такі висновки.

За перший період проведення вимірювань зафіксовано порушення встановлених нормативних вимог щодо усталеного відхилення напруги та коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю.

1 Коефіцієнт несиметрії напруги змінювався в межах від 0 до 5,2 %. Протягом дослідного періоду спостерігалось перевищення нормально допустимого значення (2 %) у 18,9 % тривалості вимірювань, а перевищення гранично допустимого значення (4 %) становило 0,4 % часу.

2 Коефіцієнти спотворення синусоїдності напруги знаходилися в діапазоні від 0,7 до 9,8 % і загалом відповідали чинним нормативним вимогам, оскільки відносний час їх виходу за межі нормально допустимих значень не перевищував 5 %.

Порівняння моментів відключення автоматики з виникненням порушень показників якості електричної енергії показало наявність чіткої кореляції між цими подіями. Встановлено однозначний зв'язок появи відхилень із перебуванням у фідерних зонах тягової мережі швидкісних поїздів типу Інтерсіті+, що створюють істотно змінні та асиметричні навантаження.

За другий період проведення вимірювань також зафіксовано порушення встановлених нормативних вимог, однак вони мають інший характер порівняно з першим етапом. Основне відхилення пов'язане з усталеним рівнем напруги, тоді як показники несиметрії та спотворення синусоїдності залишалися в межах норми.

3. Усталене відхилення напруги протягом 96 % тривалості вимірювань перевищувало нормально допустиме значення 5 %. Перевищення гранично допустимого значення 10 % не фіксувалося.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю змінювався від 0 до 1,08 %. Значення, що відповідає 95 % інтегральній імовірності, становить 0,56 %, що не перевищує нормативно допустимих меж.

5 Коефіцієнти спотворення синусоїдності кривої напруги змінювалися у межах 0–2,5 % у одних фазах та 0–3,8 % у інших. Перевищень ані нормального допустимого значення (8 %), ані граничного (12 %) не виявлено.

Для схеми роздільного живлення тягового та районного навантаження, що застосовувалася під час другого періоду, більшість дослідних показників якості електроенергії відповідає вимогам ГОСТ 13109-97. Винятком є лише усталене відхилення напруги, спричинене підвищенням рівнем напруги у живильній мережі.

Загальний аналіз обох періодів випробувань дозволяє встановити, що при живленні від одного трансформатора на тяговій підстанції виникає невідповідність окремих показників якості електроенергії. Натомість роздільне живлення тягового та районного навантаження двома трансформаторами забезпечує відповідність нормативним вимогам щодо коефіцієнта несиметрії та рівнів спотворення синусоїдності напруги.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Бабаєв В. С., Блиндюк В. С., Супрун О. Д. Проектування систем електропостачання залізниць: навч. посібник. Харків: УкрДУЗТ, 2019. 291 с.
2. Бондар І. Л., Бондар О. І., Сиченко В. Г. Електричні системи та мережі нетягових споживачів залізничного транспорту: навч. посібник. Д.: Вид-во, 2009. 180 с.
3. Гаврилюк В. І. Огляд проблемних питань якості електроенергії на електрифікованих залізницях. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2017. № 14. С. 11-20.
4. Гончаров Ю. П., Панасенко Н. В., Сиченко В. Г. Обмеження спектру періодичних сигналів зворотних зв'язків у силових активних фільтрах для систем електропостачання контактних мереж. *Гірнична електромеханіка та автоматика. Науково-технічний збірник НГУ*. 2010. № 84. С. 28-38.
5. ГОСТ 13109-97. Електрична енергія. Електромагнітна сумісність технічних засобів. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. Уведено в Україні: 1999. К.: Держстандарт України, 1999. 32 с.
6. Далека В. Х., Нем В. К., Скуріхін В. І. Електропостачання електричного транспорту: навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2012. 168 с.
7. ДСТУ 2104-92 (ГОСТ 12965-93). Трансформатори силові масляні загального призначення класів напруги 110 і 150 кВ. Технічні умови. Офіц. вид. Чинний від 01.07.1993. Київ : Держстандарт України, 1992. 59 с.
8. ДСТУ 2105-92. Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови. Офіц. вид. Чинний від 01.07.1993. Київ : Держстандарт України, 1992. 41 с.
9. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). Київ, ДП «УкрДНЦ», 2014. 32 с.
10. Електроенергетика України. Структура, керування, інновації: моно-

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

графія/ Хоменко І. В., Плахтій О. А., Нерубацький В. П., Стасюк І. В.. Харків: НТУ «ХП», ТОВ «Планета-Прінт», 2020. 132 с.

11. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання / Жежеленко І. В., Шидловський А. К., Півняк Г. Г., Саенко Ю. Л. Д.: нац. гірн. ун-т, 2009. 319 с.

12. Енергетика тягових мереж: монографія / Сиченко В.Г., Кузнецов В.Г., Босий Д.О., Саблін О.І. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2017. 210 с.

13. Земський Д. Р. Підвищення ефективності передачі електроенергії для нетягових споживачів електрифікованих залізниць змінного струму : дис. ... д-ра філософії : спец. 275. Дніпро, 2020. 194 с.

14. Кирик В. В. Електричні мережі та системи : підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. 324 с.

15. Кирик В.В. Методи організації гнучких електричних систем: навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 47 с.

16. Ковернікова Л. І. Централізоване зниження рівня вищих гармонік у мережі високої напруги з розподіленими нелінійними навантаженнями за допомогою пасивних фільтрів. *Електрика*. 2010. № 9. С. 50-55 с.

17. Колонтаєвський Ю.П., Сосков А.Г. Електроніка та мікросхемотехніка: підруч. для студентів ВНЗ. К.: Каравела, 2009. 416 с.

18. Кошелєв К. С. Вибір параметрів статичного компенсатора реактивної потужності СТАТКОМ. *Електротехніка*. 2008. № 7. С. 34-38.

19. Курінний А. Г., Лютий А. П. Оцінка несинусоїдності напруги при аналізі якості електроенергії. *Д.: Електрика*. 2005. № 8. С. 2-9.

20. Охріменко В. М. Споживачі електричної енергії: підручник. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 286 с.

21. Розанов, Ю. К., Грінберг Р.П. Гібридні фільтри для зниження несинусоїдності струму та напруги в системах електропостачання. *Електротехніка*. 2006. № 10. С. 55-60.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

22. Руденко В.С., Ромашко В.Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. К.: Либідь, 1993. 432 с.
23. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка, Т.1. Елементна база електронних пристроїв.: підручник. К.: Обереги, 2000. 300 с.
24. Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. Електроніка і мікросхемотехніка, Т.4. Силові пристрої: підручник. К.: Каравела, 2013. 640 с.
25. Сиченко В. Г., Босий Д. О. Критерії керування пристроями компенсації реактивної потужності тягових підстанцій змінного струму. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2009. № 83. С. 36-45.
26. Сиченко В. Г., Босий Д.О. Аналіз режимів напруги на приєднаннях тягових підстанцій змінного струму. *Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2009. С. 82-86.
27. Сиченко В. Г., Зубенко В.А. Оцінка ефективності функціонування пасивних згладжуючих фільтрів тягових підстанцій. *Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. акад. В. Лазаряна*. Дніпропетровськ, 2008. С. 63-68.
28. Сиченко В. Г., Саєнко Ю. Л., Босий Д. О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія. Дніпропетровськ : Стандарт-Сервіс, 2015. 340 с.
29. Сиченко В. Г., Саєнко Ю. Л., Босий Д. О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія. Дн-вск: Видавництво ПФ “Стандарт-Сервіс”, 2015. 344 с.
30. Сосков А.Г., Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка: Підручник. К.: Каравела, 2015. 536 с.
31. Сосков А.Г., Соскова І.А. Напівпровідникові апарати: комутація управління, захист: навч. для студ. вишів. К.: Каравелла, 2005. 344 с.

					02.15.ЕЕ2426-ЕС.КРМ.2026-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54