


Міністерство освіти і науки України

Український державний університет науки і технологій  
Факультет «Управління енергетичними та економічними процесами»  
Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІСЕ


 /Дмитро БОСИЙ/  
(підпис)

Дата 20.01.2025

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: «Ефективність передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів»  
за освітньою програмою: «Енергетичні та електромеханічні системи на транспорті»  
зі спеціальності: «141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Виконав: студент  
групи «ЕЕ2326»

  
\_\_\_\_\_  
(підпис студента)


/ Олександр ПИСАРЕНКО /  
\_\_\_\_\_  
(Ім'я ПІРІЗВИЩЕ)

Керівник:

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

/доц. Денис ЗЕМСЬКИЙ /  
\_\_\_\_\_  
(посада, Ім'я ПІРІЗВИЩЕ)

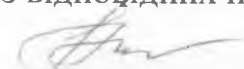
Нормоконтролер:

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

/доц. Ірина ПОТАПЧУК/  
\_\_\_\_\_  
(посада, Ім'я ПІРІЗВИЩЕ)

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

Студент

  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Дніпро – 2025 рік

**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»  
(шифр та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
Завідувач кафедри ІСЕ

  
/Дмитро БОСИЙ  
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата 01.04.24

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу

магістр з електроенергетики, електротехніки  
та електромеханіки

(ступінь вищої освіти)

студенту Писаренку Олександр Васильовичу  
(Прізвище, Ім'я, По батькові)

1. Тема роботи: Ефективність передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів  
Керівник роботи: Земський Денис Романович, доктор філософії, без звання  
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "01" квітня 2024 р. № 246 ст

2. Строк подання студентом 12.01.2025 р.  
роботи:

3. Вихідні дані до роботи: відкриті технічні, наукові та нормативні джерела, навчальна література.

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

4.1 Аналіз сучасного стану передачі електроенергії у електричних мережах  
4.2 Забезпечення паралельної роботи трансформаторів з різними схемами підключення до живлячої мережі

4.3 Підвищення ефективності передачі електроенергії

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):


5.1 Векторні групи трансформаторів.

5.2 Схема електропостачання ділянки

5.3 Результати моделювання

№ з п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз сучасного стану передачі електроенергії у електричних мережах	10.11.2024	30 %
2	Забезпечення паралельної роботи трансформаторів з різними схемами підключення до живлячої мережі	15.12.2024	60 %
3	Підвищення ефективності передачі електроенергії	29.12.2024	95 %
4	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри.	12.01.2025	100 %
5	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії.	20.01.2025	

студент

  
 \_\_\_\_\_  
 (підпис)

**Олександр ПИСАРЕНКО**  
 \_\_\_\_\_  
 (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

керівник роботи

  
 \_\_\_\_\_  
 (підпис)

**Денис ЗЕМСЬКИЙ**  
 \_\_\_\_\_  
 (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## ВІДОМІСТЬ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

другого (магістерського) рівня вищої освіти Писаренка О.В. на тему:  
«Ефективність передачі електроенергії в мережі з різними групами з'єднання  
обмоток трансформаторів»

Складова кваліфікаційної роботи	Кількість	Обсяг
Пояснювальна записка	1	68 стор.
Графічна частина (за наявності)	1	4 арк.
Демонстраційний матеріал	1	14 слайдів
Електронна частина (за наявності): назва файлу з розширенням	-	-

Керівник:



/ Денис ЗЕМСЬКИЙ /

Нормоконтролер:



/ Ірина ПОТАПЧУК /

Завідувач кафедри ІСЕ:



/ Дмитро БОСИЙ /

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра на тему «Ефективність передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів» містить: 68 с., 11 рис., 2 табл., 1 додаток, 24 джерела.

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

*Мета роботи* – підвищення ефективності передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів.

*Метод дослідження* – аналітичні розрахунки за регламентованими методиками по виразах, які базуються на класичних положеннях теорії аналізу синусоїдних лінійних електричних кіл в усталеному режимі.

В роботі наведено аналіз сучасного стану передачі електроенергії у електричних мережах з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів, зокрема у мережах живлення нетягових споживачів залізничного транспорту на ділянках системи тяги змінного струму.

Також проаналізовано відомі шляхи модернізації ліній ДПР, які спрямовані на підвищення ефективності передачі електричної енергії до нетягових споживачів і передбачають реалізацію режиму двостороннього живлення. Викладено способи забезпечення паралельної роботи трансформаторів з різними схемами підключення до живлячої мережі.

Одночасно викладено методику визначення основних показників ефективності передачі електроенергії у лініях «два проводи – рейки» а саме втрат активної потужності у лінії, сталого відхилення напруги у точці приєднання споживача та коефіцієнта несиметрії напруги на навантаженні. Представлено результати моделювання режиму роботи лінії при однобічному та двобічному живленні.

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

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ .....	13
1.1 Сучасні напрямки підвищення енергоефективності у галузі електроенергетики України .....	13
1.2 Загальна характеристика процесів передачі електроенергії у нетягових мережах залізниць України .....	16
1.3 Висновки до розділу 1 .....	20
2 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБИТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ З РІЗНИМИ СХЕМАМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО ЖИВЛЯЧОЇ МЕРЕЖІ .....	21
2.1 Особливості режимів роботи електричних мереж з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів. Схеми живлення ліній ДПР .....	21
2.2 Порівняльний огляд способів організації двостороннього живлення ліній ДПР .....	24
2.3 Підключення нетягових споживачів залізничного транспорту до ліній ДПР .....	28
2.4 Висновки до розділу 2 .....	37
3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	39
3.1 Структура схеми живлення дослідної ділянки електричної мережі та її електричні навантаження .....	39
3.2 Принципи аналізу електромагнітних процесів у лініях ДПР .....	40
3.3 Визначення показників ефективності роботи лінії ДПР при односторонньому живленні .....	45

					<b>02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ</b>				
Зм..	Арк.	№ Докум.	Підпис	Дата					
Розробив	Писаренко О.В.				<b>Ефективність передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів</b>	Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.	Земський Д.Р.						7	68	
Н. контр.	Потапчук І.Ю.					МОН України. УДУНТ Кафедра ІСЕ, група EE2326			
Затв.	Босий Д.О.								

3.4	Визначення показників ефективності роботи лінії ДПР при двосторонньому живленні через фазоповоротний пристрій .....	51
3.5	Висновки до розділу 3 .....	55
	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	57
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	60
	СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ .....	63
	ДОДАТОК А .....	64

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

Актуальність теми роботи у першу чергу обумовлена тим, що електричні мережі середньої напруги представляють собою важливу частину енергетичної системи України. Від цих мереж, які реалізовано у вигляді повітряних та кабельних ліній, через трансформаторні підстанції заживлено низьковольтні споживачі електричної енергії. Відзначимо, що близько 50% електричних мереж вже на 2020 рік потребували капремонту, реконструкції та повної заміни через їх значну зношеність та постійне недофінансування робіт з оновлення електричних мереж. Взагалі, як зазначено в [1] тривалість експлуатації майже всього обладнання наявного в енергетичній системі України перевищила 30 років. Тому на сьогодні потребують заміни багато елементів наявних в Україні електричних мереж, як такі, які внаслідок тривалої експлуатації вичерпали свій амортизаційний ресурс або які було зруйновано через бойові дії.

Вочевидь невід'ємною частиною проблеми реконструкції електричних мереж України є одночасно і підвищення ефективності їх функціонування. Можна виділити наступні ключові показники ефективності передачі електроенергії – це передусім втрати електроенергії у мережі, втрати напруги та коефіцієнт несиметрії напруги на приєднанні споживача.

Усе викладене вище у повній мірі стосується електричної системи живлення нетягових споживачів залізничного транспорту. Через зазначені мережі відбувається розподіл значної частки від усієї частини електроенергії, яка переробляється системою електропостачання електрифікованих залізниць. Тому питання підвищення ефективності передачі електроенергії у вищезгаданих мережах є актуальним.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Обрані у кваліфікаційній роботі напрями дослідження мають безпосередній зв'язок з виконанням науково-дослідних робіт в Українському державному університеті науки і технологій за наступними темами:

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. «Математико-інформаційне забезпечення процесу моделювання режимів роботи систем електричного транспорту», № держреєстрації 0119U103838;

2. «Забезпечення паралельної роботи та підвищення якості електроенергії у лініях електропостачання нетягових споживачів залізниць змінного струму», № держреєстрації 0119U103771;

3. «Розробка інтелектуальних технологій ефективного енергозабезпечення транспортних систем», № держреєстрації 0116U006982.

### **Мета та задачі дослідження**

Метою роботи є підвищення ефективності передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Виконати аналіз сучасного стану передачі електроенергії у електричних мережах. Визначити при цьому ключові фактори, які впливають на ефективність передачі електроенергії в електричних мережах нетягових споживачів залізничного транспорту, які отримують живлення від ліній типу «два проводи – рейка» (ДПР).

2. Дослідити відомі способи забезпечення паралельної роботи трансформаторів з різними схемами підключення до живлячої мережі з метою визначення ефективних шляхів реалізації режиму двостороннього живлення навантажень ліній ДПР.

3. Шляхом аналітичних розрахунків здійснити прогнозування впливу впровадження режиму двостороннього живлення лінії ДПР дослідної ділянки на основні показники ефективності передачі електроенергії в зазначеній лінії.

**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.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

1. Вперше запропоновано новий комплексний підхід до вирішення проблеми підвищення ефективності передачі електроенергії по лініях ДПР, який полягає у поєднанні розв'язання цієї проблеми з питаннями підвищення якості електроенергії у лінії ДПР на основі запропонованого кола ключових показників зазначеного процесу. Така новація дозволить розширити можливості застосування означених ліній для живлення сучасних енергоефективних споживачів електричної енергії розрахованих на роботу в електричних мережах загального призначення.

2. У роботі здійснено подальший розвиток методики електричних розрахунків ліній ДПР з урахуванням взаємної індуктивності провідників окремих фаз, який проявився у її адаптації до умов і особливостей дослідної ділянки, що у свою чергу дозволило максимально спростити обсяг необхідних розрахунків і час потрібний для їх виконання.

#### **Практичне значення отриманих результатів**

1. Оформлені у вигляді розрахункового документу системи комп'ютерної математики Mathcad розрахункові співвідношення можуть бути використані для прогнозування ефекту від впровадження режиму двобічного живлення для інших ділянок ліній ДПР параметри яких відрізняються від дослідної ділянки.

2. Проведені розрахунки показали, що у порівнянні з існуючою схемою консольного живлення реалізація двобічного режиму живлення дослідної ділянки через фазоповоротний пристрій дозволяє зменшити стале відхилення напруги на споживачі майже в 1,26 рази, знизити коефіцієнт несиметрії лінійних напруг на споживачі за зворотною послідовністю в 1,33 рази при одночасному зниженні удвічі втрат активної потужності в лінії.

#### **Особистий внесок**

Постановку мети та задачі дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні дослідження, аналітичні розрахунки, здійснені у рамках даної кваліфікаційній роботі а також формулювання усіх висновків і рекомендацій, виконано здобувачем самостійно.

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Апробаційна робота [2] написана автором самостійно із залученням керівника з метою наукового консультування.

### **Апробація результатів роботи**

Основні положення та результати кваліфікаційної роботи доповідались на Всеукраїнській науково-технічній конференції студентів і молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту 2024» 27 листопада 2024, м. Дніпро, Україна.

### **Публікації.**

Основні положення кваліфікаційної роботи опубліковано у тезах доповіді Всеукраїнської науково-технічної конференції [2].

### **Структура і обсяг роботи**

Кваліфікаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, переліку посилань та одного додатку. Основний текст роботи викладений на 44 сторінках, містить 11 рисунків за текстом і 2 таблиці. Перелік посилань із 24 найменувань займає 4 сторінки, додаток – 5 сторінок. Повний обсяг кваліфікаційної роботи складає 65 сторінок.

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

## 1.1 Сучасні напрямки підвищення енергоефективності у галузі електроенергетики України

Характерними сучасними тенденціями, які притаманні енергетичній галузі України на сучасному етапі її розвитку є збільшення попиту та зростання ціни на електричну енергію. У свою чергу це викликає потреби у розробці та впровадженні заходів щодо підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів [3]. Одночасно найбільш значущими факторами, які стримують подальший розвиток енергоощадних технологій є великий обсяг капіталовкладень та тривалий термін окупності заходів із енергозбереження; сприйняття інвестицій в енергоефективність як складних та ризикованих, у першу чергу через вплив бойових дій; низька поінформованість суспільства щодо передових енергоощадних технологій; непропорційно великий вплив держави на ринок електроенергії, котрий заважає споживачам у повній мірі оцінити потенціал заходів із енергозбереження, а ціноутворення та відсутність конкуренції не стимулює інвестування енергетичних компаній в енергозбереження [4].

Зміни означеної ситуації, що відбулися у сфері електроенергетики передусім пов'язано з прийняттям закону «Про ринок електричної енергії» [5], згідно з яким держава переходить від моделі «Єдиного покупця-продавця» електричної енергії, функції якого виконувало ДП «Енергоринок», до більш гнучкої моделі. Регулювання відносин учасників ринку здійснюється на підставі ряду нормативно-правових актів, основними серед яких є [6], [7], [8], [9], [10] та [11]. Головною метою цієї реформи є створення конкурентного середовища з метою стимулювання енергетичних компаній підвищувати якість та ефективність надання послуг, а споживачам надається можливість обирати постачальника електроенергії.

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одночасно існуюче на сьогодні законодавство визначає гарантовані показники якості електропостачання, розміри та порядок їх надання компенсацій споживачам від постачальників та операторів систем розподілу електричної енергії [12]. Зокрема гарантується дотримання показника зміни напруги та усунення причин недотримання якості електричної енергії у відповідності до Кодексу систем розподілу [8] та ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення» [13]. На додачу до цього споживач має право на відшкодування збитків, які ним понесені унаслідок недотримання гарантованих значень показників якості електроенергії з провини власника електричних мереж.

Такі державні програми, як «Стратегія сталого розвитку «України-2020» [14] та «Енергетична стратегія України на період до 2035 року» [15] визначають ключові пріоритети щодо забезпечення енергетичної безпеки країни а також просування у напрямку до енергоефективного та енергоощадного використання енергоресурсів за рахунок впровадження інноваційних технологій, та поліпшення показників надійності. До зазначених пріоритетів, визначених у сфері електроенергетики, належать: лібералізація ринку електроенергії, інтеграція енергосистеми України з континентальною європейською енергосистемою ENTSO-E, розвиток відновлюваних джерел електроенергії, модернізація обладнання, зниження втрат електричної енергії та зменшення кількості незапланованих перерв з вини постачальника за індексом середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні в системі (SAIDI). Останній показник представляє собою відношення сумарної тривалості довгих перерв в електропостачанні в точках комерційного обліку електричної енергії, в яких було припинене електропостачання за звітний період, до загальної кількості точок комерційного обліку електричної енергії [8].

Передбачається, що практична реалізація сукупності заходів із підвищення ефективності електропостачання має призвести до ситуації, при якій показники роботи електроенергетичної інфраструктури до 2035 року повинні досягти

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значень, аналогічних тим, що вже на сьогодні досягнуто у державах Європейського союзу. Високий рівень втрат електроенергії та відключень свідчить про наявність гострої необхідності інвестування в інфраструктуру, через що вимушено продовжується експлуатація фізично зношеного обладнання електричних мереж, не підвищується пропускна здатність мереж.

Актуальний шлях підвищення енергоефективності та надійності функціонування елементів електричної мережі а також приймачів електричної енергії тісно пов'язаний із розв'язанням проблеми електромагнітної сумісності, інтерес до якої в останні десятиліття значно зріс. В основ цього лежить є зростання споживання електричної енергії, ріст чисельності чутливих до якості електроенергії пристроїв, а також нелінійного, різкозмінного та несиметричного навантаження, електромагнітний вплив якого здатен призводити до зниження надійності та безпеки роботи електротехнічних систем, пришвидшити процеси старіння ізоляції та збільшити втрати електроенергії в процесі її передачі та споживанні.

Основні сучасні способи забезпечення електромагнітної сумісності систем електропостачання із споживачем та зменшення втрат електроенергії при її передачі сформульовано у [3]. Зокрема до таких способів належать:

– оптимізація завантаження електричних мереж під час їх проектування, експлуатації та розвитку, у тому числі впровадження «розумних мереж», накопичувачів та розподіленої генерації;

– переведення електричних мереж на більш високі рівні напруги, впровадження принципу «глибокого вводу»;

– застосування устаткування зі зменшеними технологічними витратами, у томи числі із використанням нових технологій;

– використання пристроїв для симетрування навантаження, управління потоками потужності, фільтрації вищих гармонічних складових та стабілізації напруги

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2 Загальна характеристика процесів передачі електроенергії у нетягових мережах залізниць України

Історично склалося, що в Україні знайшла застосування концепція улаштування тягових підстанцій залізниць системи тяги як постійного так і змінного струму при якій головний понижувальний трансформатор (ГПТ) має трифазне виконання. Раніше такий підхід давав змогу здійснювати живлення від шин тягових підстанцій трифазні електричні мережі станцій, депо, пристроїв колійної автоматики, інших об'єктів залізничної інфраструктури, електричних приймачів сторонніх (незалізничних) та побутових споживачів, що істотно розширює сферу використання системи нетягового електропостачання. Зокрема від тягового трансформатора (який у системі тяги змінного струму одночасно є і головним понижуючим) отримують живлення промислові та аграрні підприємства, котрі пов'язані залізничним сполученням, населені пункти, окремі райони у містах. Н сьогодні, АТ «Укрзалізниця» є власником електричних мереж та виконує функції з розподілу електричної енергії, а створене Укрзалізницею підприємство ТОВ «Енерго Збут Транс» здійснює комерційну діяльність із постачання електроенергії непобутовим споживачам.

До початку повномасштабного вторгнення електроенергетичним комплексом Укрзалізниці за рік перероблялася електрична енергія у обсязі близько 13 000 млн. кВт·год. Передача електроенергії електромережами залізниць стороннім споживачам складала близько 7 800 млн. кВт·год, у тому числі 800 млн·кВт·год споживачам, що отримують живлення безпосередньо від мереж залізниці. Збут електричної енергії стороннім споживачам сягав порядку 800 млн. гривень. Дохід від передачі електроенергії місцевими мережами залізниці для споживачів першого та другого класу напруги відповідно складав 50 та 40 млн. гривень за рік [16].

У відповідності з даними НКРЕКП та Міністерства енергетики та захисту довкілля за 2018 р. [17, 18] технологічні втрати електроенергії (ТВЕ) при її передачі у мережах залізниць становили 408 млн кВт·год або 6,7 % відпуску електроенергії у мережу, а тривалості планових та непланових перерв в

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

електропостачанні склали 283 та 208 хв відповідно. Значення цих показників у два рази менше від середніх значень по країні. Експлуатаційна довжина ліній електропостачання нетягових споживачів Укрзалізниці згідно [16] складає 233 км повітряних та 1,12 км кабельних ліній напругою 110 кВ, 119 км повітряних та 0,82 км кабельних ліній напругою 35 кВ, 4369 км ліній типу «два проводи – рейка» (ДПР) напругою 27,5 кВ, 14277 км повітряних та 1931 км кабельних ліній напругою 10 кВ. Довжина кабельних ліній напругою 6 кВ складає 768 км.

Частина ліній електропостачання нетягових споживачів розташовано на опорах контактної мережі, що зменшує ширину зближення її проводів із контактною мережею до 6 м та відповідно збільшує ймовірність погіршення показників якості електроенергії. Зокрема до таких ліній належать лінія поздовжнього електропостачання напругою 10 кВ (ділянки постійного струму) та лінія «два проводи-рейка» напругою 27,5 кВ (ділянки змінного струму). Останнього часу в електричних системах Укрзалізниці стала дедалі більше проглядатися тенденція щодо інтенсифікації використання ліній ДПР. Зокрема за даними філії «Енергозбут» Укрзалізниці, втрати електроенергії у лінії ДПР за 2019 р. зросли до 5 911 тис. кВт·год проти 2 293 тис. кВт·год у 2017 р., що пов'язано із збільшенням об'єму переданої енергії споживачам, приєднаних до мережі, складовою частиною якої є лінії ДПР з 68 млн. кВт·год у 2017 р. та до 85 млн. кВт·год у 2019 р [16].

Також експлуатація ліній ДПР, супроводжується наявністю впливу тягового струму через гальванічний зв'язок із тяговою мережею. В основі цього лежить особливість конструкції, яка власне і представлена у назві лінії – «два проводи-рейка» або ДПР, що вказує на використання рейкової колії у якості третього провідника. Лінія ДПР, як і контактна мережа, отримує живлення від розподільчої установки РУ-27,5 кВ тягової підстанції, що забезпечує живлення нетягових споживачів незалежно від режиму роботи контактної мережі. З свого часу дало зазначена особливість у період масштабної електрифікації дозволила суттєво зменшити капітальні витрати на будівництво лінії для живлення прилеглих до залізниці районів із малопотужними споживачами, але у сучасних

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умовах, при потребі забезпечити високу якість електричної енергії використання ліній ДПР може виявитись недоцільним, зважаючи на більшу кількість погіршуючих якість електроенергії факторів порівняно із іншими лініями нетягового електропостачання.

Вплив системи тягового електропостачання на процес передачі електричної енергії, що описаний у [19], зводиться до питання електромагнітної сумісності та пов'язаними із ними додатковими втратами електричної енергії та проблемою надійності електропостачання.

Наведені внаслідок електромагнітної індукції у двох провідниках лінії ДПР, які розташовано на опорах контактної мережі з польової сторони, додаткові спади напруги, можуть сягати 4 кВ, особливо наприкінці довжини зближення, у свою чергу спричиняють додаткові втрати електроенергії та збільшують стале відхилення напруги на споживачах. Одночасно, потенціал рейки відносно землі практично не змінюється, якщо знехтувати невеликим спадом напруги викликаний протіканням тягового струму. Відповідно система векторів лінійних напруг на споживачі стає несиметричною.

При проїзді електровозу потенціал у місці приєднання комплектної трансформаторної підстанції (КТП) до рейки збільшується. Найбільше його можливе значення буде у випадку роботи електрорухомого складу у режимі пуску. При пускових струмах величина потенціалу рейок перевищує значення, що відповідають 1...2 % номінальної напруги лінії ДПР. Величина наведеної напруги на проводах лінії ДПР від електричного поля тягової мережі також не перевищує 2 % від номінальної напруги лінії та має несуттєвий вплив на якість електроенергії [3].

Тяговий струм унаслідок роботи перетворювачів електрорухомого складу та специфіки параметрів системи тягового електропостачання має лише наближену до синусоїди форму, що обумовлює появу вищих гармонік у наведеній напрузі у лінії та збільшує несиметрію та несинусоїдність напруги при протіканні його рейкою.

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

До вищевикладеного слід додати, що якість напруги на шинах підстанції, від яких отримує живлення тягова мережа та відходять фідери лінії ДПР, може бути суттєво погіршена через несиметричне завантаження тягового трансформатора та вплив зі сторони системи зовнішнього електропостачання. Таким чином, на процес передачі електричної енергії лінією ДПР впливає сукупність негативних факторів, сумарний вплив яких може призвести до виходу за межі визначених у стандарті допустимих значень показників якості електричної енергії.

В роботі [3] наводяться наступні відомості про показники якості електроенергії у лініях ДПР, зафіксовані у кінці зони зближення лінії ДПР із тяговою мережею: відхилення напруги до  $-12\%$ ; коефіцієнт несинусоїдності напруги у межах від  $8,5\%$  до  $12,7\%$ , несиметрія напруги  $-7,5\dots 10,6\%$ .

Низька якість напруги живлення призводить до погіршення умов роботи приймачів електроенергії, а саме збільшує ймовірність відмови у їх роботі, зменшує термін експлуатації обладнання, викликає додаткові втрати потужності в процесі її передачі та перетворення. Від'ємне відхилення напруги призводить до зменшення обертового моменту, зростання втрат потужності асинхронних двигунів та зменшення коефіцієнту потужності керованих вентиляльних перетворювачів. Несиметрія системи трифазних напруг викликає наявність струмів зворотної послідовності, що утворюють поле яке гальмує обертання ротора двигуна. Зростання обертового моменту до необхідного значення пришвидшує процеси старіння ізоляції, тому робота у мережі із несиметричною напругою потребує використання двигунів із більшою встановленою потужністю, ніж та, що обумовлена виробничими процесами. Вищі гармоніки створюють негативний вплив на ізоляцію та ємнісні елементи, прискорюючи у них іонізаційні процеси, що, у свою чергу призводить до старіння матеріалу діелектрика та до відмову роботі приймачів електричної енергії.

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 1.3 Висновки до розділу 1

1. Проблема збільшення ефективності процесу передачі електроенергії через електричні мережі є надзвичайно актуальною для енергетичної галузі України внаслідок таких факторів як нестача генеруючих маневрових потужностей втрачених під час бойових дій, виходу з ладу значної кількості електричного обладнання систем розподілу у тому числі і через вичерпання терміну експлуатації.

2. Зростання кількості нових чутливих до якості електроенергії пристроїв, а також нелінійного, різкозмінного та несиметричного навантаження у поєднанні з процесами інтеграції відновлюваних джерел енергії в систему електропостачання електрифікованих залізниць у подальшому спричинятиме зростання економічної ефективності технічних заходів по модернізації електричних мереж електропостачання нетягових споживачів електрифікованих залізниць України.

3. Один з актуальних шляхів підвищення енергоефективності та надійності функціонування елементів електричних мереж нетягових споживачів тісно пов'язаний із розв'язанням проблем електромагнітної сумісності. Найбільшою мірою це стосується ліній типу «два проводи-рейка» (ДПР), які через низку технічних особливостей працюють в найбільш несприятливих умовах.

4. У першу чергу в електричних системах що отримують живлення від ліній ДПР потребують покращення показники якості електроенергії пов'язані з режимом напруги мережі, втратами електроенергії та несиметрією системи трифазних напруг у місцях приєднання приймачів.

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## **2 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБИТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ З РІЗНИМИ СХЕМАМИ ПІДКЛЮЧЕННЯ ДО ЖИВЛЯЧОЇ МЕРЕЖІ**

### **2.1 Особливості режимів роботи електричних мереж з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів. Схеми живлення ліній ДПР**

При розгляді даного питання передусім слід відзначити необхідність розрізняти режими однобічного (консольного) та двобічного живлення мережі, при чому кожен такий режим за своїм характером може бути як нормальним, так і аварійним. Відомо, що для технічної реалізації режиму двобічного живлення, трифазні трансформатори застосовані для цього повинні мати одну групу з'єднання обмоток, тобто кут зсуву фаз між електрорушійними силами первинної та вторинної обмоток у вказаних трансформаторів має бути той самий. В той же час існують мережі в яких з конструктивних міркувань використовуються трансформатори різних груп, що приводить до неможливості реалізації режиму двобічного живлення без вживання фазоповоротних пристроїв.

Характерним прикладом описаної ситуації є електричні мережі не тягових споживачів залізничного транспорту на ділянках системи тяги змінного струму, які отримують живлення від ліній типу «два проводи – рейки» (ДПР).

Основною схемою живлення лінії ДПР є схема однобічного живлення від однієї з тягових підстанцій [20]. У разі відмикання живлячого фідера (основного живлення) лінія перемикається на однобічне живлення від сусідньої тягової підстанції (резервне живлення). У випадку приєднання лінії ДПР до однойменних виводів трансформаторів суміжних тягових підстанцій з неспівпадаючим чергуванням фаз вторинних напруг після перемикавання лінії з основного живлення на резервне зміниться напрям обертання магнітного поля в трифазних двигунах і вони будуть обертатись у протилежний бік. Щоб уникнути цього у разі переходу на резервне живлення від суміжних тягових підстанцій, слід зберегти порядок чергування фаз. Тому при підключенні

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проводів лінії ДПР до шин напругою 27,5 кВ випереджуючу фазу мережі підключають до випереджуючої фази підстанції і, відповідно, відстаючу фазу – до відстаючої (див. рис. 2.1 та рис. А.2, додаток 1).

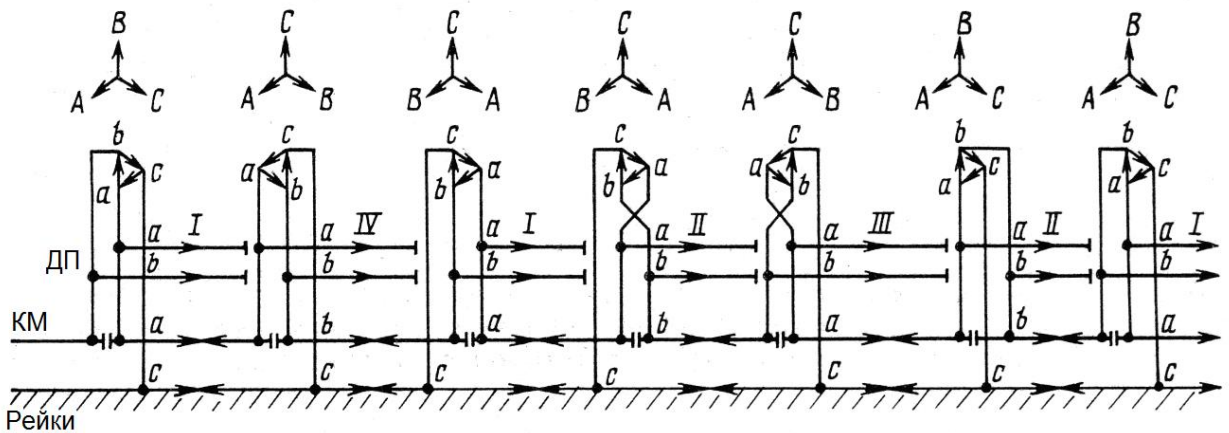


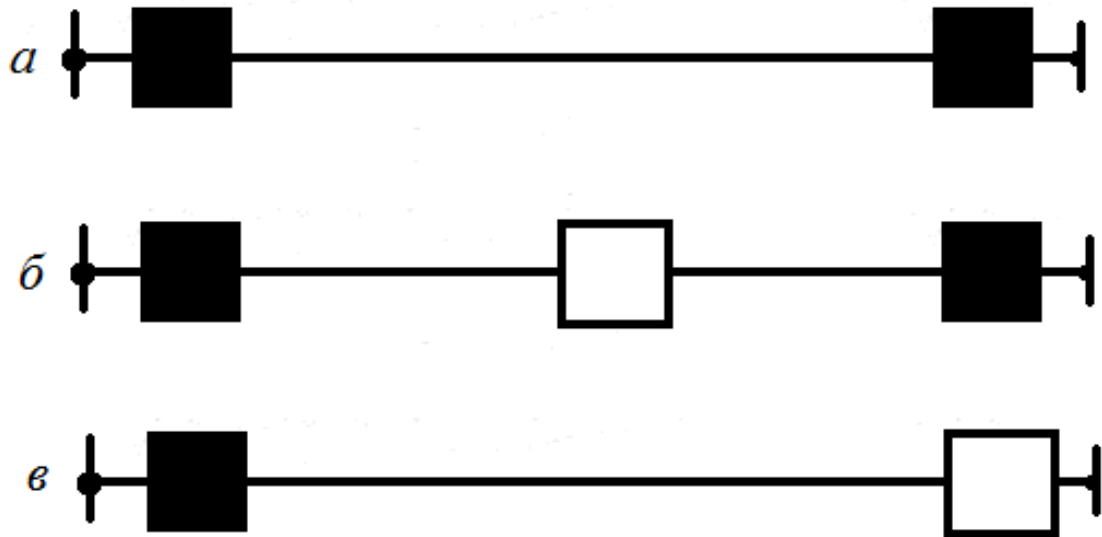
Рисунок 2.1 – Принципова схема однобічного живлення лінії ДПР від тягових підстанцій

При застосуванні зазначеної схеми лише у разі наявності відносно рівномірного розподілу навантажень малої потужності вздовж лінії не відбувається суттєвого збільшення втрат енергії порівняно з іншими схемами живлення. В сполучі з пристроями автоматичного повторного вмикання (АПВ) і телекеруванням вимикачами фідерів лінії схема консольного живлення вважається достатньо надійною. До переваг цієї системи слід віднести можливість застосування простих і надійних захистів від багатозазних коротких замикань та селективного захисту від замикань на землю. Очевидними недоліками, притаманними усім схемам однобічного (консольного) живлення є погіршений режим напруги на споживачах на кінці лінії а також збільшені втрати електроенергії у порівнянні із схемою двобічного живлення.

Двобічне (паралельне) живлення лінії (рис. 2.2,а) забезпечує поліпшення експлуатаційних показників роботи (зниження втрат напруги та енергії). Це дає змогу зменшити витрати кольорового металу в разі, коли вибір перерізу проводів обумовлений перевіркою за втратою напруги. Але при цьому ускладнюється релейний захист лінії від багатозазних коротких замикань через

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

необхідність виконання його спрямованим, а також можлива неселективна робота захисту від однофазних замикань на землю у разі зовнішніх коротких замикань. Головне ж, як було вже зазначено вище у схемі живлення необхідно взяти технічні заходи з метою узгодження груп живлячих трансформаторів сусідніх підстанцій.



а - двобічне; б - консольне з АВР; в - консольне резервоване

Рисунок 2.2. Можливі варіанти схем живлення ліній ДПР:

Зустрічно-консольне живлення лінії (рис. 1.2,б) вимагає влаштування пункту секціонування з роз'єднувачем або масляним вимикачем для можливості подачі напруги на відімкнену ділянку лінії від суміжної підстанції. Така схема може бути виправдана лише за наявності на ділянці споживача першої категорії, для якого потрібне живлення від двох незалежних джерел. В цьому випадку пункт секціонування з вимикачем суміщається з ТП такого споживача і доповнюється пристроєм АВР на секційному вимикачі. За необхідності може встановлюватись автономне джерело електроенергії (ДГА – дизель-генераторний агрегат).

## 2.2. Порівняльний огляд способів організації двостороннього живлення ліній ДПР

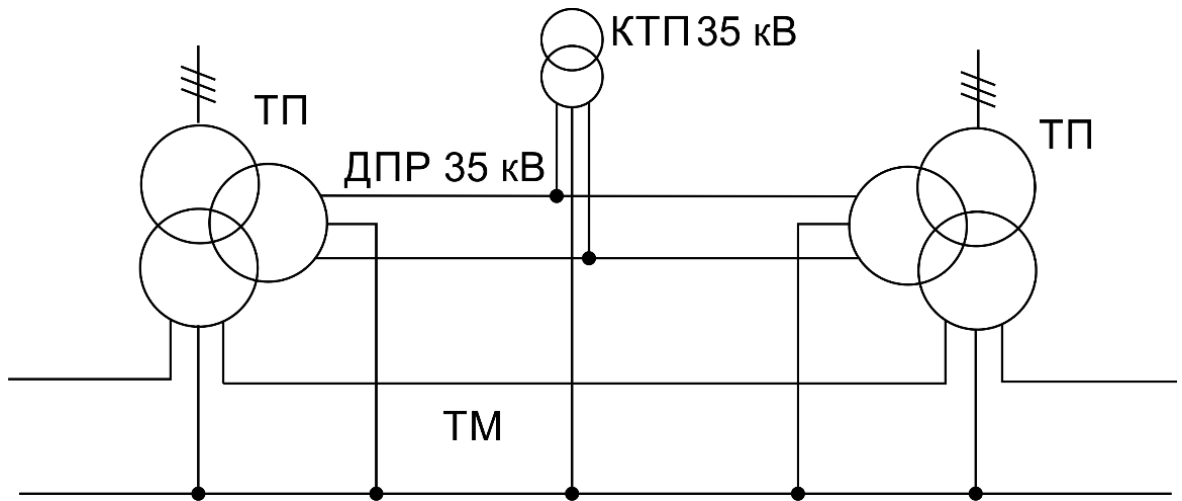
Як вже було зазначено вище, комплексне розв'язання проблеми підвищення ефективності передачі електричної енергії в електричних мережах з лініями ДПР можливо за рахунок забезпечення режиму двостороннього живлення. Це може бути здійснено у різний спосіб але у будь-якому разі такий підхід потребує реалізації певного комплексу технічних заходів відповідно до обраного способу. Докладний порівняльний аналіз таких способів наведено в [3], нижче стисло розглянемо сутність основних із них.

Зокрема, існує відомий спосіб забезпечення двостороннього живлення ліній електропостачання, який полягає у переведенні лінії ДПР на живлення від обмотки середньої напруги 35 кВ тягового трансформатора зі схемою з'єднання фаз у «зірку» (рис. 2.3).

У такому разі виникає необхідність, по-перше, проведення реконструкції існуючих ліній ДПР, а по-друге заміни понижуючих трансформаторів нетягових споживачів, оскільки підвищується ступінь напруги передачі електроенергії. Слід також враховувати, що відома умова рівності напруг короткого замикання на сусідніх підстанціях має виконуватися, у іншому разі описаний спосіб заміни обладнання підстанції.

Згідно з іншим способом для вирішення зазначених 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 (рис. 2.4).

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

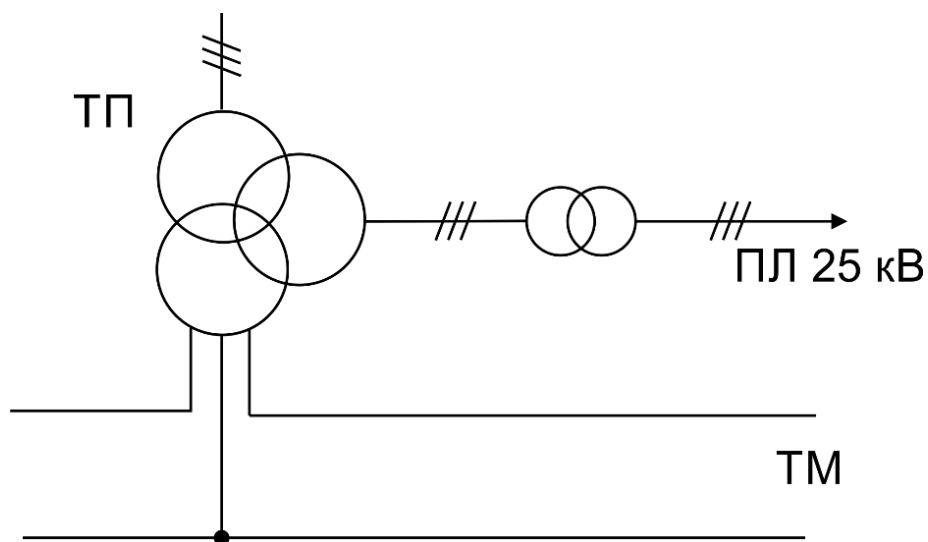


ТП – тягова підстанція; КТП ДПР – комплектна трансформаторна підстанція; ТМ – тягова мережа; ДПР – лінія «два проводи-рейка»

Рисунок 2.3 – Схема живлення нетягових споживачів від ДПР 35 кВ

Такий спосіб дозволяє усунути кондуктивний зв'язок між системою тягового електропостачання і мережею для живлення нетягових споживачів, лінія стає симетричною та зрівнюється електромагнітний вплив тягової мережі на фазні проводи.

Слід відзначити, що запропонована схема принципово може бути застосовано у тому числі і для двостороннього живлення щоправда лише, коли районні обмотки на суміжних підстанціях з'єднанні у «зірку» та навіті в один бік. Наприклад, вважаючи, що вектори напруги районних обмоток суміжних підстанцій зображені на векторних діаграмах, що на рис. 2.5., паралельна робота трансформаторів на трифазне навантаження можлива, коли поєднані виводи їх обмоток так, як показано пунктирними лініями на рис. 2.5.



ТП – тягова підстанція; ТМ – тягова мережа; ПЛ – повітряна лінія системи нетягового електропостачання

Рисунок 2.4 – Схема електропостачання нетягових споживачів змінного струму через додатковий трансформатор

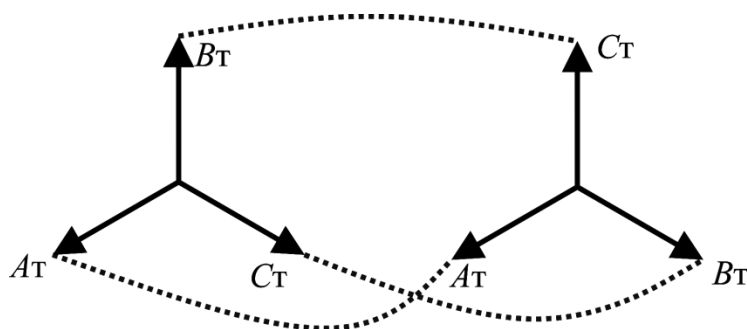


Рисунок 2.5 – Системи векторів напруги районних обмоток з'єднаних у «зірку»:  
 $A_T, B_T, C_T$  – виводи обмоток

Додамо, що виявляється складнішим врахувати фазування тягових підстанцій для паралельної роботи трансформаторів через районні обмотки, що з'єднані у «трикутник», оскільки конфігурація векторів їхньої напруги матиме дзеркальну симетрію.

Зважаючи на те, що наявність районних обмоток з позицій забезпечення електричної тяги у принципі не є обов'язковою, а також можливість експлуатації неоднотипних тягових трансформаторів на суміжних підстанціях,

можна дійти до висновку, що у багатьох випадках буде доцільно зберегти живлення від тягової обмотки із визначеним рівнем напруги 27,5 кВ, яка завжди з'єднана у «трикутник», а для забезпечення двостороннього живлення використовувати фазоповоротний пристрій (ФПП), приєднаний до шин тягових шин підстанції. То ж далі розглянемо спосіб двостороннього живлення лінії ДПР через зазначений пристрій.

Для забезпечення двостороннього живлення нетягових споживачів від шин підстанцій 27,5 кВ необхідно щоб незалежно від конфігурації системи векторів вхідної напруги ФПП система векторів напруги, отримана на його виході, мала один і той самий вигляд.

Як показано в [22] технічно реалізувати це можливо, використавши трифазний трансформатор, конструкція якого повинна передбачати можливість встановлення схеми з'єднання обмоток «зірка-трикутник» першої (У/Д-1) та одинадцятої (У/Д-11) групи.

На рис. А.3, Додаток А показано шість способів приєднання підстанцій до зовнішньої мережі та шість відповідних схем підключення фазоповоротного пристрою до мережі, що забезпечує однакову систему векторів напруги для двостороннього живлення споживача від трифазної лінії.

Векторні діаграми, приведені на рис. А.4 (Додаток А), дозволяють продемонструвати як змінюються системи векторів лінійних напруг при чергуванні фаз тягового трансформатора та застосуванні фазоповоротного пристрою.

При чергуванні приєднань введів підстанції до живлячої мережі змінюється послідовність обертання лінійних напруг на первинних обмотках трансформаторів таким чином, що колінеарні вектори у трикутниках напруг високої обмотки суміжних підстанцій знаходяться у протифазі. Наслідком цього є те, що системам векторів напруги суміжних тягових підстанцій притаманна дзеркальна симетрія.

Розглянемо ситуацію, коли обмотки тягового трансформатора з'єднані у «зірку» та «трикутник», що утворює одинадцятку векторну групу, а вводи

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмотки високої напруги підключені до зовнішньої мережі, як показано на схемі рис. А4 (Додаток А) для підстанції ЕЧЕ2, то ФПП матиме схему з'єднання обмоток У/Д-1, вивід фази а тягової обмотки трансформатора повинен бути приєднаний до виводу В фазоповоротного пристрою, а виводи трансформатора b та с – до виводів ФПП А та С відповідно. На рис. А3 по цій схемі підключено фазоповоротний пристрій ФПП2.

Таким чином описаний вище метод є найбільш універсальним, оскільки дозволяє забезпечити можливість одночасного живлення споживачів від суміжних тягових підстанцій із різними конфігураціями систем векторів лінійної напруги. При цьому коли 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.

### **2.3. Підключення нетягових споживачів залізничного транспорту до ліній ДПР**

Нетягові споживачі залізничного транспорту підключають до ліній ДПР через комплектні трансформаторні підстанції [20]. Застосування КТП для нетягових споживачів залізничного транспорту забезпечує індустріалізацію будівництва і монтажу підстанції, знижує обсяг будівельно-монтажних робіт, дозволяє в умовах експлуатації при необхідності замінювати встановлені КТП на інші, більшої потужності.

Щоглові трансформаторні підстанції, що були поширені раніше на залізничних станціях, майже повністю змінені на КТП [20].

Для підмикання споживачів до лінії «два проводи–рейки» (ДПР) розроблені КТП напругою 25 кВ різної потужності. Основні технічні дані таких КТП наведені в табл. 2.1.

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 – Основні технічні характеристики комплектних трансформаторних підстанцій для ліній ДПР

Тип КТП	Потужність КТП, кВ·А	Тип трансформатора	Потужність трансформатора, кВ·А	Напруга на вторинній обмотці, кВ	Маса КТП, кг
Однофазні					
КТП-2/25	2	ЗНОМ-35-65	2	0,23	170
КТП-4/25	4	ЗНОМ-35-65	2x2	0,23	250
КТП-10/25	10	ОМ-10/27,5	10	0,23	475
КТП-П-2/25	2	ЗНОМ-35-65	2	0,23	250
Трифазні					
КТП-25/25	25	ТМ-25/27,5	25	0,4/0,23	1035
КТП-100/25	100	ТМ-100/27,5	100	0,4/0,23	1760
КТП-250/25	250	ТМ-250/27,5	250	0,4/0,23	2775
КТП-400/25	400	ТМ-400/27,5	400	0,4/0,23	3710

Для однофазних КТП та трифазних типу КТП-25/25, КТП-П-2/25 (рис. 2.6) передбачені запобіжники ПКН 001-35, що дозволяє відмовитись від використання рейок як природних заземлювачів на перегонах та утворювати самостійні контури заземлення КТП, які забезпечують необхідну електробезпеку.

Конструкції вказаних КТП передбачають установку на окремих фундаментах та опорах трансформатора з шафою низької напруги (власне КТП) та запобіжників ПКН 001-35. При цьому, з метою забезпечення умов безпеки обслуговуючого персоналу, КТП та конструкція з запобіжниками повинні мати самостійні, не пов'язані між собою контури заземлення. На спільній конструкції разом із запобіжниками монтується роз'єднувач, що служить для приєднання підстанції до лінії ДПР, та трубчастий розрядник для захисту від атмосферних перенапруг.

Роз'єднувачі, запобіжники та розрядники постачаються заводом-виробником разом з КТП.

Для резервного електропостачання від лінії ДПР сигнальних точок автоблокування застосовують підйомно-опускную трансформаторну підстанцію

типу КТП-П-2/25. Все устаткування 25 кВ та трансформатори типу ЗНОМ-35-65 змонтовано на рухомій рамі, яка може пересуватись з робочого (крайнього верхнього) положення в нижнє для виконання технічного обслуговування та ревізії.

Підйомно-опускнун КТП-П-2/25 встановлюють на опорі контактної мережі (роз'єднувач для підключення до лінії ДПР не потрібен – з'єднання виконується штепсельними роз'ємами). Нерухома конструкція КТП-П-2/25 кріпиться до опори контактної мережі за допомогою хомутів.

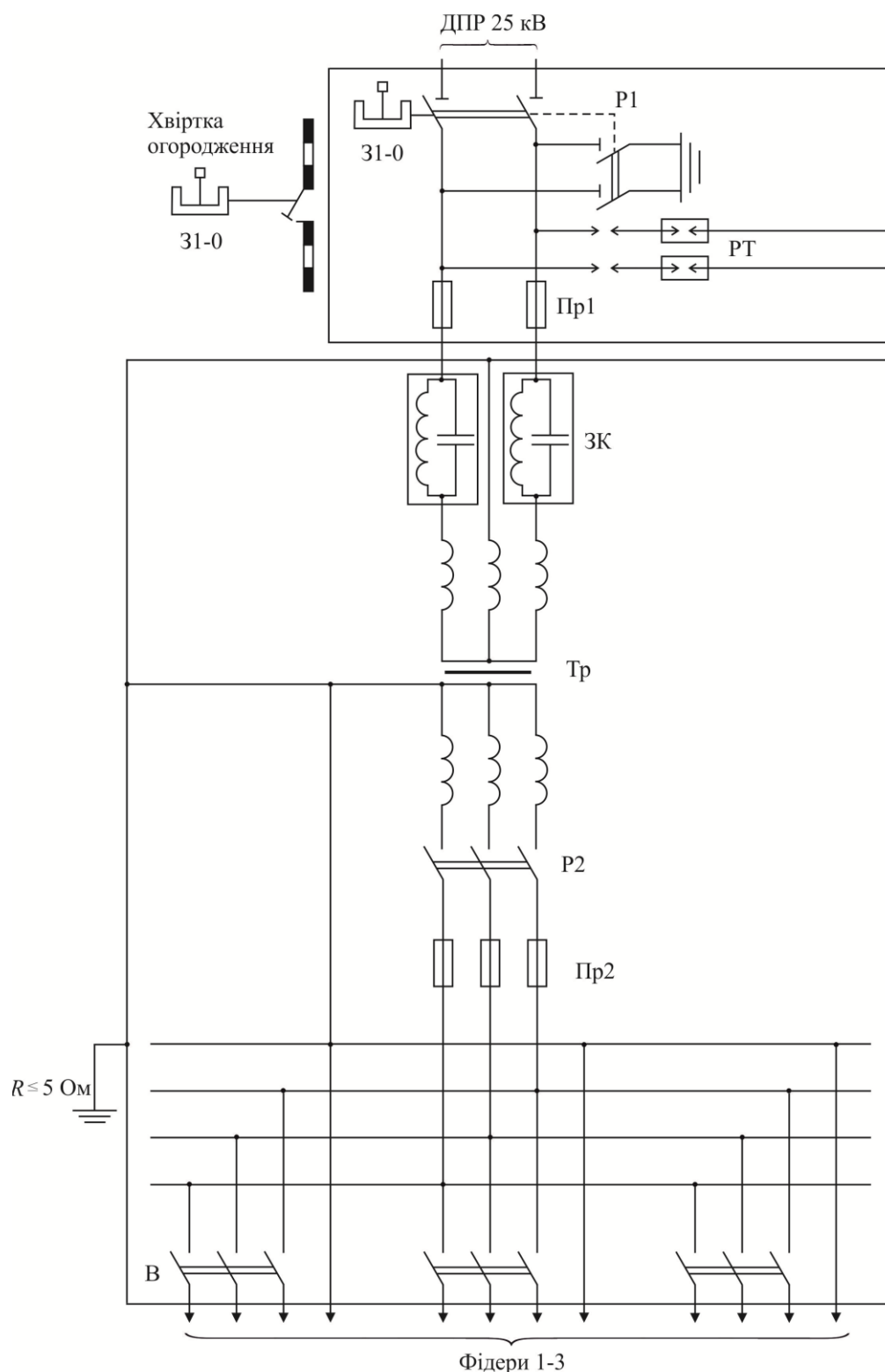
Використання підйомно-опускної підстанції забезпечує повну безпеку її обслуговування, тому що роботи з заміни запобіжників, ревізії трансформатора тощо виконуються на повністю вимкненій підстанції в нижньому положенні рухомої рами.

Конструкцію з запобіжником, роз'єднувачем та розрядником встановлюють на опорі контактної мережі. Якщо ж «польовий» бік опори зайнятий підвіскою інших проводів, конструкцію встановлюють на окремій опорі.

На рис. 2.7 зображена схема підключення КТП-(100–400)/25 до лінії ДПР з улаштуванням роз'єднувача на опорі контактної мережі.

Відпайку від лінії ДПР до роз'єднувача та трансформатора виконують тим же проводом, яким прокладена лінія ДПР.

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Р1 – роз'єднувач двополюсний РНДЗ-1-35/1000; РТ – розрядник трубчастий РТФ-35/1-5; Зп1 – запобіжник ПКН001-35; ЗК – запірний контур; Тр – трансформатор трифазний 25/0,4 кВ типу ТМЖ-25/25,7; Зп2 – запобіжник вводу 0,4 кВ; В – вимикач автоматичний АК-63-3

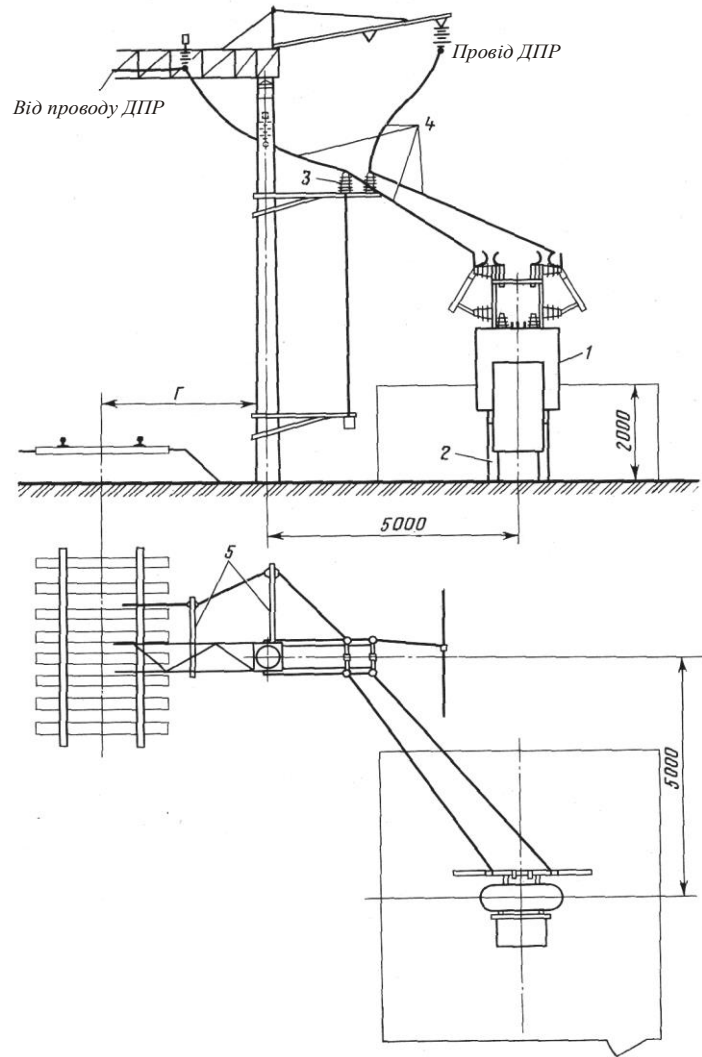
Рисунок 2.6 – Принципова схема КТП-25/25

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ

Арк.

31



1 – КТП; 2 – фундамент; 3 – роз’єднувач двополюсний; 4 – проводи;  
 5 – кронштейн для кріплення проводу відгалуження до роз’єднувача; Г– габарит  
 Рисунок 2.7 – Схема підключення КТП – (100-400)/25 до лінії ДПР

Специфічними і дуже поширеними видами приймачів, які отримують живлення від вторинних кіл КТП ліній ДПР є різноманітні види електрифікованого колійного інструменту. Зокрема до найбільш поширених видів електрифікованого інструменту, який використовується на колійних роботах [20], належать:

*електричний вібраційний шпалопідбивач* – для ущільнення баласту під шпалою, зазвичай працюють одночасно чотирма або вісьмома шпалопідбивачами;

*рейкорізальні верстати* – для обрізання рейок та заготівлі коротких рейок;

*рейкосвердлильні верстати* – для свердління отворів у шийках рейок;

*рейкошліфувальні верстати* – призначені для обробки (шліфування) рейок і деталей стрілочних переводів;

*шрубOVERти* – для закручування та викручування колійних шрубів, гайок клемових та закладних болтів;

*гайкові ключі* – для загвинчування та відгвинчування стикових болтів та ін.

Основні електричні дані колійних інструментів наведені в таблиці 2.2.

Весь електрифікований інструмент, що застосовується в колійному господарстві, розрахований на підключення до трифазного джерела напругою 220 В. Таким джерелом на перегонах у тому числі може бути і переносний бензоелектричний агрегат.

На станціях поряд з бензоелектричними агрегатами застосовують стаціонарні пристрої для підмикання колійного інструменту, які містять в собі знижувальні трансформатори, лінії напругою 220 В та струмовідбірні точки.

На деяких залізницях виконані стаціонарні пристрої для підмикання електроінструмента на перегонах із прокладанням ПЛ 220 В на опорах контактної мережі або на опорах ліній поздовжнього електропостачання.

Величина навантаження колійного інструмента, що одночасно підмикається до однієї струмовідбірної точки, залежить від характеру виконуваних робіт і може змінюватись у широких межах. Для виконання електричних розрахунків і визначення граничної довжини плеча ПЛ напругою 220 В на станції слід обчислити розрахункове навантаження, що споживається однією колійною бригадою.

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.2 – Характеристики основних колійних електроінструментів

Призначення інструмента	Тип*	Споживана потужність, кВт	Номинальний струм, А	Коефіцієнт потужності $\cos \varphi$
Шпалопідбивач	ЕШП9	0,37	1,8	0,77
Рейкорізка	РМЗ	1,0	4,5	0,78
Рейкосвердел	РСМ1	1,7	6,5	0,78
Рейкосвердел	1024В	0,75	3,2	0,79
Рейкошліфувалка	МРШЗ	0,4	1,8	0,82
Шрубверт	ШВ2	1,0	4,5	0,84
Костилезабивач електропневматичний	ЕПКЗ	0,75	3,8	0,78
Костилевисмикувач	КВД1	0,4	1,8	0,82
Колійний гайковий ключ	ПГК	0,6	2,5	0,83
Ключ електрогайковий	ЕК1М	0,4	1,8	0,82

\*Позначення за оригіналом виробника транслітеровані українською абеткою.

За розрахункове приймають навантаження від одночасної роботи восьми шпалопідбивачів на підбиванні однієї шпали, що складає 2,96 кВт або 3,8 кВ·А. Розрахункове навантаження вважають прикладеним у кінці плеча живлення (в горловині станції), що створює максимальний момент навантаження для ПЛ напругою 220 В.

У відповідності з ГОСТ 13109-97 відхилення напруги на затискачах електродвигунів від номінальної має складати  $\pm 5 \dots \pm 10 \%$ .

При підмиканні навантаження 3,8 кВ·А в кінці ПЛ напругою 220 В максимальна довжина лінії, виконаної проводом А-35 за допустимого відхилення напруги – 5 % складе 0,7 км. Насправді ж довжина плеча ПЛ напругою 220 В до стрілкової горловини може складати 1–1,2 км і більше. Але, враховуючи, що прийняті розрахункові умови (підключення розрахункового навантаження 3,8 кВ·А в кінці плеча живлення) трапляються відносно рідко, з метою зниження капітальних затрат і економії кольорового металу можна вважати допустимим розрахункове відхилення напруги на затискачах колійного інструмента в межах  $\pm 10 \%$  від номінального. В цьому випадку при реальних

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

навантаження на більшій частині живлячої лінії буде забезпечений потрібний рівень напруги.

Для живлення колійного інструменту на залізничних станціях споруджуються спеціальні мережі напругою 220 В зі струмовідбірними точками або використовуються магістральні мережі зовнішнього освітлення станції, що нормально не вмикаються в денний час.

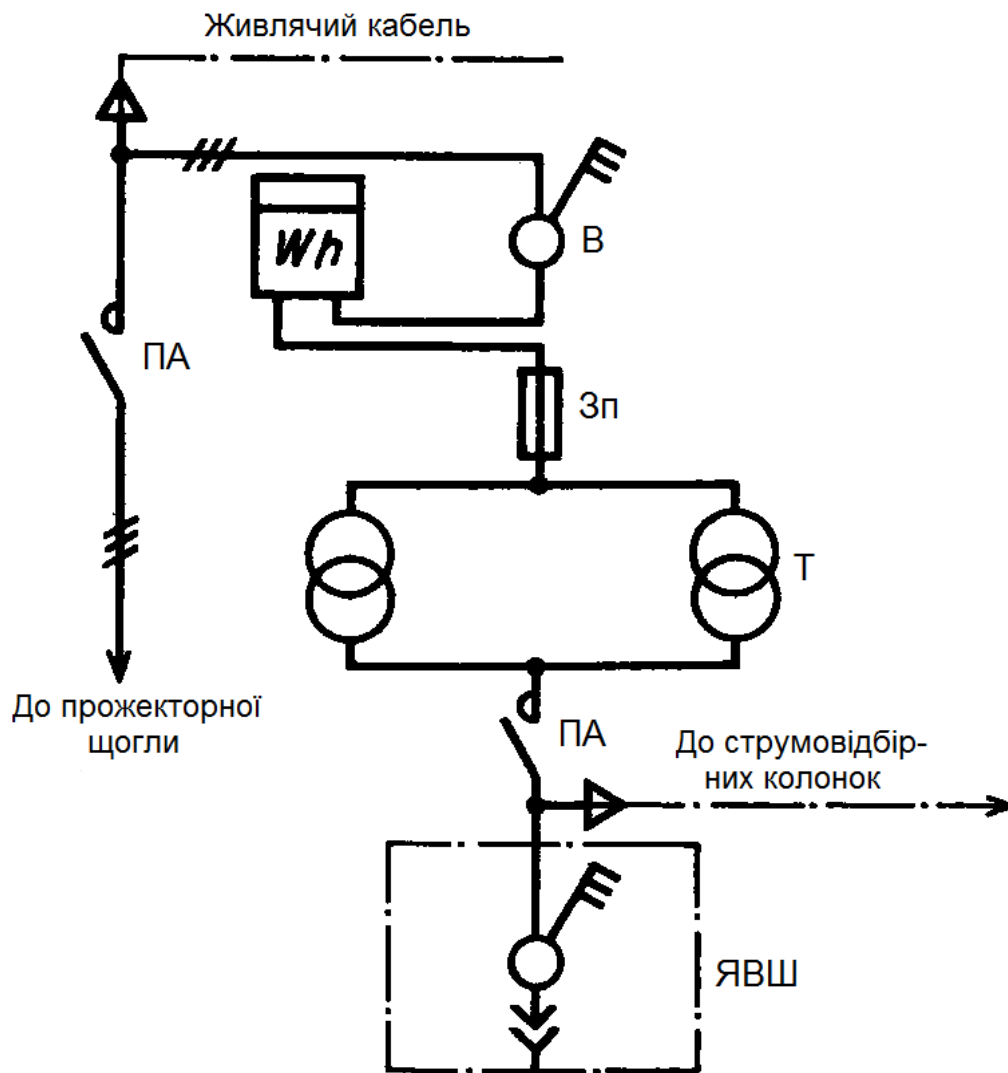
На великих станціях для електропостачання інструменту можуть використовуватись лінії для живлення прожекторного освітлення станції. У разі використання ліній напругою 380/220 В, що живлять прожекторне освітлення для електропостачання інструменту на всіх прожекторних щоглах встановлюються магнітні пускачі, що відмикають навантаження кожної щогли. Керування магнітними пускачами здійснюють дистанційно черговим по станції або автоматично від фотоелектричного реле.

Мережу прожекторного освітлення розраховують за допустимою втратою напруги і, тому як правило, переріз проводів та кабелів виявляється більшим, ніж потрібно за струмовим навантаженням. Навантаження колійного інструменту порівняно з навантаженням прожекторного освітлення невелике. Отже, проводи і кабелі мережі прожекторного освітлення за допустимим нагрівом можуть дозволити одночасне вмикання тих та інших навантажень. Однак, колійні роботи проводяться в основному в світлі години доби, тому суміщення навантажень, як правило, не буде.

Для живлення колійного інструменту на прожекторних щоглах встановлюють шафи зі знижувальними трансформаторами ТСЗІ потужністю 4 кВ·А або 2×2,5 кВ·А напругою 380/220 В (рис. 2.8) і прокладають розподільну мережу зі струмовідбірними точками – колонками, що являють собою металеві шафи з ящиком ЯВШ-3-25 (рис. 2.9).

Колонки можуть розташовуватись у міжколійї через 5–6 колій парку на відстані 130–150 м одна від одної по довжині паркових колій.

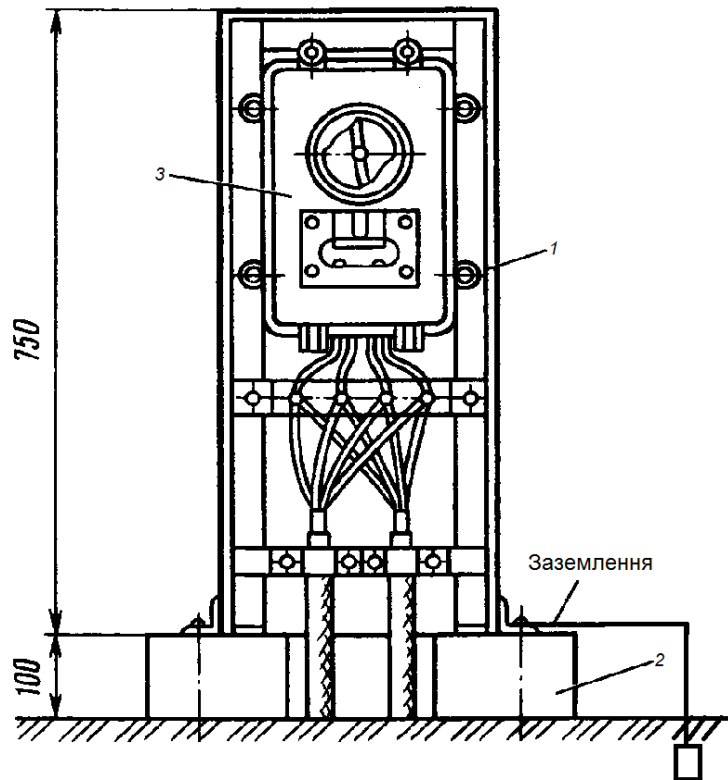
					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



ПА – магнітний пускач; В – пакетний вимикач; Зп – запобіжник ПР2-60;  
 Тр – трансформатор ТСЗИ-2,5; ЯВШ – ящик з вимикачем та штепсельним роз'ємом  
 ЯВШ-3-25

Рисунок 2.8 – Схема шафи для живлення колійного інструменту

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



1 – металева шафа; 2 – фундамент; 3 – ящик ЯВШ-3-25

Рисунок 2.9 – Колонка для підмикання інструменту

Зауважимо, що використання мережі прожекторного освітлення для живлення колійного інструменту дає суттєву економію порівняно з улаштуванням спеціальних мереж напругою 220 В.

#### 2.4 Висновки до розділу 2

1. Електричні мережі нетягових споживачів залізничного транспорту, які отримують живлення від ліній ДПР представляють собою характерний приклад мереж із різними групами з'єднання обмоток трансформаторів. Через таку їх конструктивну особливість у переважній більшості випадків нормальним режимом їх роботи є режим консольного (однобічного) живлення з можливим резервуванням від сусідньої тягової підстанції.

2. Як свідчать дані, наведені у п.2.4 істотну частину навантажень лінії ДПР складають специфічні приймачі з групи колійного інструменту, які характеризуються коефіцієнтами потужності у діапазоні від 0,77 до 0,83.

						02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
							37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

3. Одночасно забезпечення режиму двобічного живлення, який характеризується принципово кращими показниками ефективності передачі електроенергії, при застосуванні будь-якого з відомих способів передбачає необхідність залучення значного обсягу капіталовкладень і проведення великої кількості робіт щодо модернізації електричної системи. Тому особливої актуальності набуває питання оцінки економічної ефективності зазначених заходів з метою визначення раціональних шляхів такої модернізації.

4. На нашу думку перспективним напрямком поліпшення показників ефективності передачі електроенергії у лініях ДПР є реалізація режиму двобічного живлення зазначених ліній через фазоповоротний пристрій.

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

#### 3.1 Структура схеми живлення дослідної ділянки електричної мережі та її електричні навантаження

Дослідна ділянка електричної мережі середньої напруги отримує живлення через лінію ДПР (фідер 2, рис. А1, додаток А) напругою 25 кВ по схемі консольного живлення від тягової підстанції з первинною напругою 110 кВ. Схема головних електричних з'єднань цієї підстанції також наведено на рис. А1, додаток А. Згідно з цією схемою зазначена тягова підстанція у свою чергу отримує живлення від енергосистеми по двох вводах від повітряних ліній напругою 110 кВ (лінії Л5 та Л6). Потужність кожного із тягових трансформаторів, які приєднано до двох різних секцій шин ОРУ-110 кВ має забезпечувати можливість живлення усіх споживачів першої та другої категорії надійності електропостачання котрі живляться від проектованої мережі з урахуванням можливого перевантаження трансформатора на 40% на час до 6 годин. Обидва трансформатори обладнано пристроями регулювання напруги під навантаженням по первинній стороні (РПН). Загальна схема живлення дослідної ділянки від лінії ДПР представлена спрощено на рис. 3.1 а докладно на рис. А1 (Додаток А).

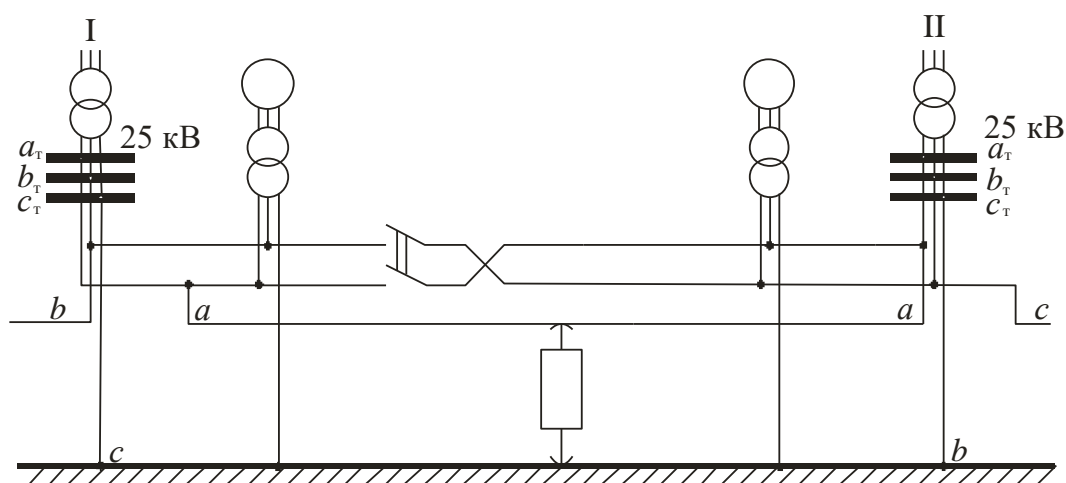


Рисунок 3.1– Схема живлення ділянки контактної мережі та ліній ДПР

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

У відповідності до цієї схеми нормальним режимом роботи мережі є консольне живлення із можливістю резервування від сусідньої тягової підстанції. Довжина лінії до місця приєднання навантаження  $l_d = 20$  км; проводи якими виконано лінію ЛПР сталєво-алюмінієві типу АС-35; потужність районного (нетягового) навантаження, приєданого в кінці лінії (посередині між двома тяговими підстанціями) ,  $S_p = 2400$  кВА при  $\cos \varphi_p = 0,81$ . Річний впорядкований графік цього навантаження наведено у додатку А. Розрахунковим будемо вважати потенційно можливий найважчий режим, при якому на всій дослідній ділянці тяговий струм в контактній мережі становить  $I_T = 260$  А при  $\cos \varphi_T = 0,84$ . Ділянка одноколійна, рейки типу Р65.

На дослідній ділянці передбачається проаналізувати вплив переходу до схеми двобічного живлення через фазоповоротний пристрій на втрати електроенергії, режим напруги у мережі і коефіцієнт несиметрії у точці приєднання споживачів.

### 3.2 Принципи аналізу електромагнітних процесів у лініях ДПР

Сучасні принципи аналізу електромагнітних процесів у лініях типу «два проводи-рейка» ґрунтуються на класичних положеннях теорії лінійних електричних кіл з зосередженими параметрами. Зокрема в основі зазначених розрахунків лежать уявлення про зображення синусоїдальних електричних величин обертовими векторами на комплексній площині та символічний метод аналізу усталених процесів у електричних колах.

Розрахунок будемо проводити згідно з методикою, яку описано в [21]. При цьому у якості ключових показників ефективності передачі електроенергії пропонується визначити стале відхилення напруги на споживачі (найбільше для усіх трьох фаз), коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності а також втрати активної потужності у лінії ДПР як у режимі консольного та і двобічного живлення.

Передусім варто зауважити, що неоднорідність фаз, значний електромагнітний вплив тягового струму в контактному проводі і рейках,

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

умови повернення струму по рейках і частково по землі суттєвим чином ускладнюють задачу електричного розрахунку лінії ДПР (рис.3.2).

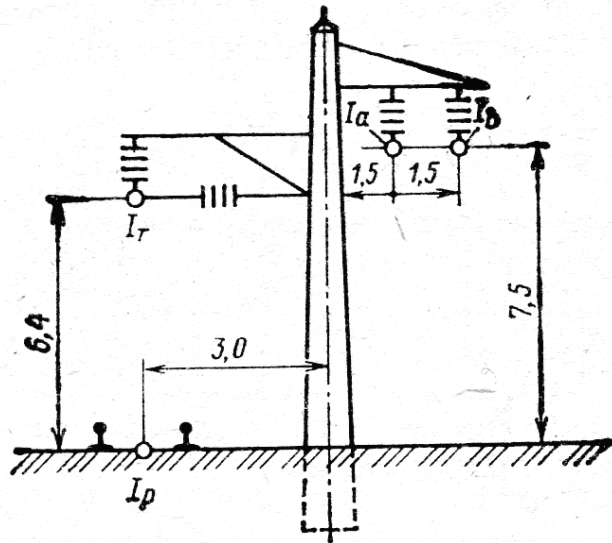


Рисунок 3.2 – Взаємне розташування провідників лінії ДПР

Далі розглянемо методику визначення параметрів системи ДПР. У разі наявності симетричного навантаження зокрема буде справедливим співвідношення  $I_c = -I_a - I_b$  і лінію ДПР можна розглядати як дві однопровідні лінії «провід-земля». Як вже було зазначено раніше, для ліній ДПР зазвичай застосовують консольну схему живлення, тобто вони розімкнені в середині тягових ділянок. Розглянемо докладніше питання щодо опорів рейок. Внаслідок поверхневого ефекту активний опір рейок більший від омичного в 5...10 разів. Через нелінійність сталі як активний так і реактивний опір рейок залежить від струму і складає орієнтовно для рейок типу Р75  $R_{P75} = 0,14...0,22$  Ом/км; внутрішній індуктивний опір теж досить великий ( $X''_{75} = 0,1...0,17$  Ом/км). Тоді комплексний опір змінному струмові частотою 50 Гц системи «рейка-земля» обчислений для одиниці довжини колії складає

$$Z_{p-z} = R_p + 0,05 + j(0,1451g \frac{D_e}{r_e} + X''), \quad (3.1)$$

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

де  $r_e$  - еквівалентний радіус рейки.

Замінюючи обидві рейки залізничної колії одним проводом з еквівалентним радіусом  $r_{e1}$ , маємо

$$r_{e1} = \sqrt{r_e d_1}, \quad (3.2)$$

де  $d_1$  - відстань між осями рейок.

При двоколінійній лінії

$$r_{e2} = \sqrt{r_{e1} \cdot d_2} = \sqrt[4]{r_e \cdot d_1 \cdot d_2^2}, \quad (3.3)$$

де  $d_2$  - відстань між осями двох колій.

ЕРС взаємоіндукції в контурі «рейки-земля»

$$\underline{E}_M = -\underline{I}_a \cdot \underline{Z}_{д-р}. \quad (3.4)$$

Струм у рейках, зумовлений цією ЕРС,

$$\underline{I}_{ра} = \frac{-\underline{E}_M}{\underline{Z}_{р-з}} = \underline{I}_a \cdot \underline{Z}_{д-р} / \underline{Z}_{р-з}. \quad (3.5)$$

Спад напруги в фазному проводі лінії ДПР з урахуванням ЕРС взаємоіндукції, обумовленої струмом у рейках залізничної колії,

$$\Delta \underline{U}_a = \underline{I}_a \cdot \underline{Z}_{пр-з} - \underline{I}_{ра} \cdot \underline{Z}_{д-р} = \underline{I}_a \cdot \left( \underline{Z}_{пр-з} - \frac{\underline{Z}_{д-р}^2}{\underline{Z}_{р-з}} \right). \quad (3.6)$$

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відповідно повний опір фази лінії ДПР з урахуванням повернення струму землею і частково рейками дорівнюватиме

$$Z_{\phi} = Z_{\text{пр-з}} - \frac{Z_{\text{д-р}}^2}{Z_{\text{р-з}}}, \quad (3.7)$$

де  $Z_{\text{пр-з}}$  – опір контуру «провід–земля»;

$Z_{\text{д-р}}$  – повний опір з урахуванням взаємоіндукції між контурами «провід лінії ДПР –земля» та «рейки–земля».

При електричному розрахунку лінії ДПР слід враховувати, що електровози змінного струму – це однофазне навантаження. Тому навіть на початку лінії ДПР на шинах 25 кВ тягової підстанції напруга несиметрична. Навантаження самої лінії ДПР симетричне. Нехай лінія ДПР протяжністю  $l_{\text{д}}$  живить декілька трифазних нетягових навантажень  $I_k$ , що розташовані на відстані  $l_k$  від її початку. Розрахункове значення струму навантаження лінії ДПР

$$I_{a(b)} = \left( \sum_k I_k \cdot l_k \right) / l_{\text{д}}. \quad (3.8)$$

Розрахункове значення струму тягового навантаження в контурі «провід лінії ДПР – земля» (з урахуванням рейок) має три складові: перша обумовлена струмом  $I_{a(b)}$  в розглядуваному контурі, друга – взаємною індукцією з контуром іншої фази, яка викликана струмом  $I_{b(a)}$ , третя – взаємною індукцією з контуром «контактна мережа – земля (рейки)», викликана струмом тягового навантаження  $I_{\text{т}}$ .

Зазвичай заземлюють (приєднують до рейок) вивід фази *c* обмотки тягового трансформатора, з'єднаної трикутником.

Спад лінійних напруг в системі ДПР у цьому випадку

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta U_{ac} = l_{\text{д}} \left( Z_{\text{ф}} I_{a\text{д}} + Z_{\text{ф-ф}} I_{b\text{д}} + Z_{\text{т-ф}} I_{\text{т}} \right); \quad (3.9)$$

$$\Delta U_{bc} = l_{\text{д}} \left( Z_{\text{ф}} I_{b\text{д}} + Z_{\text{ф-ф}} I_{a\text{д}} + Z_{\text{т-ф}} I_{\text{т}} \right), \quad (3.10)$$

де 
$$I_{a\text{д}} = I_{\text{д}} e^{j(30^\circ - \varphi_{\text{д}})}; \quad (3.11)$$

$$I_{b\text{д}} = a^2 I_{a\text{д}} = I_{\text{д}} e^{j(-90^\circ - \varphi_{\text{д}})}; \quad (3.12)$$

$I_{\text{д}}$ ,  $\varphi_{\text{д}}$  – відповідно модуль та кут зсуву струму фази  $a$  трифазного навантаження ліній ДПР.

Враховуючи, що  $\Delta U_{ba} = \Delta U_{bc} - \Delta U_{ac}$ , визначаємо відповідну пряму послідовність лінійних спадів напруг.

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{1}{3} \left( \Delta U_{ac} + a \Delta U_{ba} + a^2 \Delta U_{cb} \right) = \frac{1}{3} \left( \sqrt{3} e^{-j30^\circ} \Delta U_{ac} + \sqrt{3} e^{j90^\circ} \Delta U_{bc} \right). \quad (3.13)$$

Підставляючи сюди вирази (3.9) та (3.10) і враховуючи, що

$$I_b = I_a e^{-j120^\circ}, \quad (3.14)$$

отримаємо:

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{l_{\text{д}}}{\sqrt{3}} \left[ e^{-j30^\circ} \left( 2Z_{\text{ф}} - Z_{\text{ф-ф}} \right) I_{a\text{д}} + e^{j30^\circ} Z_{\text{т-ф}} I_{\text{т}} \right]. \quad (3.15)$$

Зворотна послідовність

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta U_{зв} = \frac{1}{3} (\Delta U_{ac} + a^2 \Delta U_{ba} + a \Delta U_{cb}) =$$

$$= \frac{l_D}{\sqrt{3}} \left[ e^{j90^\circ} (Z_{\phi} - 2Z_{\phi-\phi}) I_{aD} + e^{-j30^\circ} Z_{T-\phi} I_T \right]. \quad (3.16)$$

Відзначимо, що при двох паралельних коліях останній член формул (3.14) – (3.16) буде складатись з двох складових.

Коефіцієнт несиметрії лінійних напруг в кінці лінії ДПР

$$\alpha_U = \alpha_{U_{III}} + \Delta U_{зв} / U_{ном}, \quad (3.17)$$

де  $\alpha_{U_{III}}$  - коефіцієнт несиметрії лінійних напруг на шинах тягової підстанції, що живить лінію ДПР. Через спад лінійних напруг прямої та зворотної послідовностей можна визначити спотворення лінійних напруг в кінці лінії ДПР:

$$\Delta U_{ba} = \Delta U_{пр} + \Delta U_{зв}; \Delta U_{ac} = \Delta U_{пр} + a^2 \Delta U_{зв}; \Delta U_{cb} = \Delta U_{пр} + a \Delta U_{зв}. \quad (3.18)$$

### 3.3 Визначення показників ефективності роботи лінії ДПР при односторонньому живленні

Розрахунок будемо проводити на підставі даних із п 3.1 згідно з методикою, викладеною у п. 3.2. орієнтуючись на векторну діаграму наведену на рис. А5, додаток А.

У відповідності до заданих значень коефіцієнтів потужності визначаємо кути зсуву як фаз для навантаження лінії ДПР, так і для тягових споживачів. Зокрема

$$\varphi_p = \arccos(\cos \varphi_p) = \arccos(0,81) = 35,9^\circ; \quad (3.19)$$

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

$$\varphi_T = \arccos(\cos \varphi_T) = \arccos(0,84) = 32,9^\circ. \quad (3.20)$$

Комплексна величина струму районного навантаження в лінії

$$\begin{aligned} I_D &= \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} e^{-j\varphi_p} = \frac{2400}{\sqrt{3} \cdot 25} e^{-j35,9^\circ} = \\ &= 44,9 - j32,5 = 55,4 e^{-j35,9^\circ} \text{ А.} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Струм тягового навантаження

$$I_T = I_T e^{-j\varphi_T} = 218,4 - j141,1 = 260 e^{-j32,9^\circ} \text{ А.} \quad (3.22)$$

Згідно з габаритами лінії ДПР (див. рис.3.2) розрахуємо комплексні погонні опори (опір на одиницю довжини)  $\underline{Z}_{\text{пр-з}}$ ,  $\underline{Z}_{\text{д-р}}$ ,  $\underline{Z}_{\text{р-з}}$ ,  $\underline{Z}_{\text{д-д}}$ ,  $\underline{Z}_{\text{т-д}}$ ,  $\underline{Z}_{\text{т-р}}$ :

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{пр-з}} &= R_{\text{пр}} + 0,05 + j(0,145 \lg \frac{D_e}{r_{\text{пр}}} + 0,016) = \\ &= 0,91 + 0,05 + j(0,145 \lg \frac{1000}{4,2 \cdot 10^{-3}} + 0,016) = \\ &= 0,96 + j0,796 = 55,4 e^{-j35,9^\circ} \text{ Ом/км;} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\text{д-р}} &= 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_e}{D_{\text{д-р}}} = 0,05 + j0,145 \lg \frac{1000}{\sqrt{(7,5^2 + 5,35^2)}} = \\ &= 0,05 + j0,796 = 1,247 e^{j39,7^\circ} \text{ Ом/км;} \end{aligned} \quad (3.24)$$

де  $D_{\text{д-р}} = \sqrt{(7,5^2 + 5,35^2)} = 9,21$  м згідно з рис. 3.1

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\text{p-3}} &= \frac{R_p}{2} + 0,05 + j(0,145 \lg \frac{D_e}{r_{e1}} + \frac{X''}{2}) = \\ &= \frac{0,16}{2} + 0,05 + j(0,145 \cdot \lg \frac{1000}{\sqrt{0,099 \cdot 1,52}} + \frac{0,12}{2}) = \\ &= 0,13 + j0,555 = 0,57e^{j76,8^\circ} \text{ Ом/км};\end{aligned}\quad (3.25)$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\text{д-д}} &= 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_e}{D} = 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{1000}{1,5} = \\ &= 0,05 + j0,409 = 0,413e^{j83^\circ} \text{ Ом/км};\end{aligned}\quad (3.26)$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\text{т-д}} &= 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_e}{D_{\text{т-д}}} = 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{1000}{5,25} = \\ &= 0,05 + j0,331 = 0,334e^{j81,4^\circ} \text{ Ом/км};\end{aligned}\quad (3.27)$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\text{т-р}} &= 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{D_e}{D_{\text{т-р}}} = 0,05 + j0,145 \cdot \lg \frac{1000}{6,4} = \\ &= 0,05 + j0,318 = 0,322e^{j81,1^\circ} \text{ Ом/км};\end{aligned}\quad (3.28)$$

Далі визначимо комплексні опори лінії ДПР  $\underline{Z}_\phi$ ,  $\underline{Z}_{\phi-\phi}$ ,  $\underline{Z}_{\text{т-}\phi}$ :

$$\begin{aligned}\underline{Z}_\phi &= \underline{Z}_{\text{п-р-3}} - \frac{\underline{Z}_{\text{д-р}}^2}{\underline{Z}_{\text{п-3}}} = 0,96 + j0,796 - \frac{(0,299e^{j80,4^\circ})^2}{0,57e^{j76,8^\circ}} = \\ &= 0,94 + j0,639 = 1,14e^{j34,1^\circ} \text{ Ом/км};\end{aligned}\quad (3.29)$$

$$\underline{Z}_{\phi-\phi} = \underline{Z}_{\text{д-д}} - \frac{\underline{Z}_{\text{д-р}}^2}{\underline{Z}_{\text{п-3}}} = 0,05 + j0,409 - \frac{(0,299e^{j80,4^\circ})^2}{0,57e^{j76,8^\circ}} =$$

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

$$= 0,033 + j0,253 = 0,255e^{j82,5^\circ} \text{ Ом/км}; \quad (3.30)$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{\tau-\phi} &= \underline{Z}_{\tau-\Delta} - \frac{\underline{Z}_{\Delta-p} \cdot \underline{Z}_{\tau-p}}{\underline{Z}_{p-3}} = 0,05 + j0,331 - \frac{0,299e^{j80,4^\circ} \cdot 0,322e^{j81,1^\circ}}{0,57e^{j76,8^\circ}} = \\ &= 0,034 + j0,162 = 0,166e^{j78,1^\circ} \text{ Ом/км}; \end{aligned} \quad (3.31)$$

Комплексні величини струмів фаз лінії ДПР обчислюємо на підставі виразів (3.11) та (3.12)

$$\underline{I}_{a\Delta} = I_{\Delta} e^{j(30^\circ - \varphi_{\Delta})} = I_{\Delta} e^{j(30^\circ - 5,9^\circ)} = 55,4e^{-j5,9^\circ} = 55,13 - j5,7 \text{ А}; \quad (3.32)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{b\Delta} &= a^2 \underline{I}_{a\Delta} = I_{\Delta} e^{j(-90^\circ - \varphi_{\Delta})} = 55,4e^{j(-90^\circ - 5,9^\circ)} = \\ &= 55,4e^{-j125,9^\circ} = -32,5 - j44,9 \text{ А}; \end{aligned} \quad (3.33)$$

$I_{\Delta}$ ,  $\varphi_{\Delta}$  – відповідно модуль та кут зсуву струму фази  $a$  трифазного навантаження ліній ДПР.

Комплексна величина струму фази  $c$  від навантажень лінії ДПР

$$\begin{aligned} \underline{I}_{c\Delta} &= -\underline{I}_{a\Delta} - \underline{I}_{b\Delta} = -(55,13 - j5,7) - (-32,5 - j44,9) = \\ &= -22,63 + j50,6 = 55,43e^{j114,1^\circ} \text{ А}. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Пряма та зворотна послідовності комплексних лінійних спадів напруг у лінії ДПР.

$$\Delta \underline{U}_{\text{пр}} = \frac{l_{\Delta}}{\sqrt{3}} \left[ (\underline{Z}_{\phi} - 2\underline{Z}_{\phi-\phi}) \underline{I}_{a\Delta} e^{-j30^\circ} + \underline{Z}_{\tau-\phi} \underline{I}_{\tau} e^{j30^\circ} \right] =$$

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned}
&= \frac{20}{\sqrt{3}} [(0,94 + j0,639 - 2(0,034 + j0,162)] \times \\
&\times 55,4e^{-j5,9^\circ} e^{-j30^\circ} + 0,166e^{j78,1^\circ} 260e^{-j32,9^\circ} e^{j30^\circ} ) = \\
&= 631 + j221 = 669e^{j19,3^\circ} \text{ В.}
\end{aligned} \tag{3.35}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \underline{U}_{\text{зв}} &= \frac{I_{\text{Д}}}{\sqrt{3}} \left[ (\underline{Z}_{\phi} - 2\underline{Z}_{\phi-\phi}) \underline{I}_{a\text{Д}} e^{j90^\circ} + \underline{Z}_{\tau-\phi} \underline{I}_{\tau} e^{-j30^\circ} \right] = \\
&= \frac{20}{\sqrt{3}} [(0,94 + j0,639 - 2(0,034 + j0,162)] \times \\
&\times 55,4e^{-j5,9^\circ} e^{j90^\circ} + 0,166e^{j78,1^\circ} 260e^{-j32,9^\circ} e^{-j30^\circ} ) = \\
&= 453 + j697 = 832e^{j57^\circ} \text{ В.}
\end{aligned} \tag{3.36}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \underline{U}_{ba} &= \Delta \underline{U}_{\text{пр}} + \Delta \underline{U}_{\text{зв}} = 631 + j221 + 453 + j697 = \\
&= 1084 + j918 = 1421e^{j40,3^\circ} \text{ В.}
\end{aligned} \tag{3.37}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \underline{U}_{ac} &= \Delta \underline{U}_{\text{пр}} + a^2 \cdot \Delta \underline{U}_{\text{зв}} = 631 + j221 + 1 \cdot e^{-j120^\circ} \cdot [453 + j697] = \\
&= 1009 - j520 = 1135e^{-j27,3^\circ} \text{ В.}
\end{aligned} \tag{3.38}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \underline{U}_{cb} &= \Delta \underline{U}_{\text{пр}} + a \cdot \Delta \underline{U}_{\text{зв}} = 631 + j221 + 1 \cdot e^{j120^\circ} \cdot [453 + j697] = \\
&= -199 + j264 = 331e^{j127^\circ} \text{ В.}
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Порівнюючи результати розрахунків по виразах (3.37) – (3.39) доходимо висновку, що серед трьох визначених комплексних спадів напруги найбільшим є спад напруги  $\Delta \underline{U}_{ba}$ . Тому саме цю величину приймаємо за розрахункову у

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

подальших обчисленнях  $\Delta \underline{U} = \Delta \underline{U}_{ba}$ . Тоді комплексна напруга на споживачі розрахункової фази

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{сп}} &= \underline{U} - \Delta \underline{U} = 25000 \cdot e^{j30^\circ} - 1421 \cdot e^{j40,3^\circ} = \\ &= 20570 + j11580 = 23600 e^{j29,4^\circ} \text{ В.} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Тоді діюче усталене значення напруги на споживачі

$$U_y = |\underline{U}_{\text{сп}}| = \left| 23600 \cdot e^{j29,4^\circ} \right| = 23600 \text{ В.} \quad (3.41)$$

Стале відхилення напруги на споживачі згідно ДСТУ 13109-97 [23].

$$\delta U = \frac{U_{\text{ном}} - U_y}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 = \frac{25000 - 23600}{25000} \cdot 100 = 5,59 \%. \quad (3.41)$$

Коефіцієнт несиметрії лінійних напруг в кінці лінії ДПР по зворотній послідовності

$$\alpha_{\text{Д}} \approx \left| \Delta \underline{U}_{\text{зв}} \right| \cdot 100 / U_{\text{ном}} = \left| 832 e^{j57^\circ} \right| \cdot 100 / 25000 = 3,33 \%. \quad (3.42)$$

Слід зауважити, що граничні значення показників якості електроенергії для сталого відхилення напруги у 5% та коефіцієнта несиметрії у 2%, які регламентовано ДСТУ 13109-97 [23] не розповсюджуються на електричні навантаження ліній ДПР, проте можна зробити висновок, що згадані приймачі працюють в гіршому режимі у порівняння із споживачами електричних мереж загального призначення у яких додержання цих показників є обов'язковим.

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Далі визначимо втрати активної потужності у лінії ДПР в режимі консольного живлення. Втрати потужності в окремих фазах

$$\Delta P_a = R_{\text{пр}} \cdot l_{\text{д}} \cdot I_{a\text{д}}^2 = 0,91 \cdot 20 \cdot 55,4^2 = 55,91 \text{ кВт.} \quad (3.43)$$

$$\Delta P_b = R_{\text{пр}} \cdot l_{\text{д}} \cdot I_{b\text{д}}^2 = 0,91 \cdot 20 \cdot 55,4^2 = 55,91 \text{ кВт.} \quad (3.44)$$

$$\Delta P_c = \frac{R_{\text{р}}}{2} \cdot l_{\text{д}} \cdot I_{c\text{д}}^2 = \frac{0,16}{2} \cdot 20 \cdot 55,4^2 = 4,92 \text{ кВт.} \quad (3.45)$$

Відповідні сумарні втрати потужності в усій лінії

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_c = 55,91 + 55,91 + 4,92 = 116,74 \text{ кВт.} \quad (3.46)$$

### 3.4 Визначення показників ефективності роботи лінії ДПР при двосторонньому живленні через фазоповоротний пристрій

Як вже відзначалося у розділі 2, застосування фазоповоротного пристрою дає змогу реалізувати режим двостороннього живлення згаданої ділянки. При цьому загальна методика та значення опорів мережі залишаються такими ж як і у п. 3.3, проте суттєвим чином змінюються електричні величини в мережі. Зокрема на підставі виразу (3.8) при розташуванні зосередженого навантаження у середині ділянки можна стверджувати, що через кожне плече живлення буде передаватися однакова повна потужність, яку можна визначити, як

$$S_{\text{р1}} = \frac{S_{\text{р}}}{2} = \frac{2400}{2} = 1200 \text{ кВА.} \quad (3.47)$$

Відповідно комплексна величина струму районного навантаження в лінії плеча живлення

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned} \underline{I}_D &= \frac{S_{P1}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} e^{-j\varphi_P} = \frac{1200}{\sqrt{3} \cdot 25} e^{-j35,9^\circ} = \\ &= 22,4 - j16,3 = 27,7 e^{-j35,9^\circ} \text{ А.} \end{aligned} \quad (3.48)$$

Струм тягового навантаження і у цьому випадку описується виразом (3.22) та дорівнює  $\underline{I}_T = 218,4 - j141,1 = 260 e^{-j32,9^\circ}$  А.

Комплексні величини струмів фаз лінії ДПР обчислюємо аналогічно виразам (3.32) та (3.33)

$$\underline{I}_{aD} = I_D e^{j(30^\circ - \varphi_D)} = I_D e^{j(30^\circ - 5,9^\circ)} = 27,7 e^{-j5,9^\circ} = 27,6 - j2,9 \text{ А}; \quad (3.49)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{bD} &= a^2 \underline{I}_{aD} = I_D e^{j(-90^\circ - \varphi_D)} = 27,7 e^{j(-90^\circ - 35,9^\circ)} = \\ &= 27,7 e^{-j125,9^\circ} = -11,3 + j25,3 \text{ А}; \end{aligned} \quad (3.50)$$

У даному випадку також  $I_D$ ,  $\varphi_D$  – відповідно модуль та кут зсуву струму фази  $a$  трифазного навантаження ліній ДПР.

Комплексна величина струму фази  $c$  від навантажень лінії ДПР

$$\begin{aligned} \underline{I}_{cD} &= -\underline{I}_{aD} - \underline{I}_{bD} = -(27,6 - j2,9) - (-11,3 + j25,3) = \\ &= -11,3 + j25,3 = 27,7 e^{j114,1^\circ} \text{ А.} \end{aligned} \quad (3.52)$$

Пряма та зворотна послідовності комплексних лінійних спадів напруг у лінії ДПР до точки розподілу живлення.

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_{np} &= \frac{I_{\Delta}}{\sqrt{3}} \left[ (\underline{Z}_{\phi} - 2\underline{Z}_{\phi-\phi}) \underline{I}_{a\Delta} e^{-j30^{\circ}} + \underline{Z}_{\tau-\phi} \underline{I}_{\tau} e^{j30^{\circ}} \right] = \\ &= \frac{20}{\sqrt{3}} [(0,94 + j0,639 - 2(0,034 + j0,162)) \times \\ &\times 27,7 e^{-j35,9^{\circ}} e^{-j30^{\circ}} + 0,166 e^{j78,1^{\circ}} 260 e^{-j32,9^{\circ}} e^{j30^{\circ}}] = \\ &= 379 + j351 = 517 e^{j42,8^{\circ}} \text{ В.}\end{aligned}\quad (3.53)$$

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_{zb} &= \frac{I_{\Delta}}{\sqrt{3}} \left[ (\underline{Z}_{\phi} - 2\underline{Z}_{\phi-\phi}) \underline{I}_{a\Delta} e^{j90^{\circ}} + \underline{Z}_{\tau-\phi} \underline{I}_{\tau} e^{-j30^{\circ}} \right] = \\ &= \frac{20}{\sqrt{3}} [(0,94 + j0,639 - 2(0,034 + j0,162)) \times \\ &\times 27,7 e^{-j5,9^{\circ}} e^{j90^{\circ}} + 0,166 e^{j78,1^{\circ}} 260 e^{-j32,9^{\circ}} e^{-j30^{\circ}}] = \\ &= 466 + j414 = 624 e^{j41,6^{\circ}} \text{ В.}\end{aligned}\quad (3.54)$$

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_{ba} &= \Delta \underline{U}_{np} + \Delta \underline{U}_{zb} = 379 + j351 + 466 + j414 = \\ &= 845 + j765 = 1140 e^{j42,1^{\circ}} \text{ В.}\end{aligned}\quad (3.55)$$

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_{ac} &= \Delta \underline{U}_{np} + a^2 \cdot \Delta \underline{U}_{zb} = 379 + j351 + 1 \cdot e^{-j120^{\circ}} \cdot [466 + j414] = \\ &= 504 - j260 = 567 e^{-j27,3^{\circ}} \text{ В.}\end{aligned}\quad (3.56)$$

$$\begin{aligned}\Delta \underline{U}_{cb} &= \Delta \underline{U}_{np} + a \cdot \Delta \underline{U}_{zb} = 379 + j351 + 1 \cdot e^{j120^{\circ}} \cdot [466 + j414] = \\ &= -213 + j548 = 588 e^{j111^{\circ}} \text{ В.}\end{aligned}\quad (3.57)$$

Порівнюючи результати розрахунків по виразах (3.55) – (3.57) знову доходимо висновку, що серед трьох визначених комплексних спадів напруги

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

найбільшим є спад напруги  $\Delta \underline{U}_{ba}$ . Тому саме цю величину приймаємо за розрахункову у подальших обчисленнях  $\Delta \underline{U} = \Delta \underline{U}_{ba}$ . Тоді комплексна напруга на споживачі розрахункової фази

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\text{сп}} &= \underline{U} - \Delta \underline{U} = 25000 \cdot e^{j30^\circ} - 1140 \cdot e^{j42,1^\circ} = \\ &= 20810 + j11740 = 23890 e^{j29,4^\circ} \text{ В.} \end{aligned} \quad (3.58)$$

Тоді діюче усталене значення напруги на споживачі

$$U_y = |\underline{U}_{\text{сп}}| = \left| 23890 e^{j29,4^\circ} \right| = 23890 \text{ В.} \quad (3.59)$$

Стале відхилення напруги на споживачі згідно ДСТУ 13109-97 [23]

$$\delta U = \frac{U_{\text{ном}} - U_y}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 = \frac{25000 - 23890}{25000} \cdot 100 = 4,45 \%. \quad (3.60)$$

Коефіцієнт несиметрії лінійних напруг в кінці лінії ДПР по зворотній послідовності

$$\alpha_{\text{Д}} \approx \left| \Delta \underline{U}_{\text{зв}} \right| \cdot 100 / U_{\text{ном}} = \left| 624 e^{j41,6^\circ} \right| \cdot 100 / 25000 = 2,49 \%. \quad (3.61)$$

Далі визначимо втрати активної потужності у лінії ДПР в режимі двостороннього живлення. Враховуючи рівність струмів у плечах живлення втрати потужності в окремих фазах дорівнюватимуть

$$\Delta P_a = R_{\text{пр}} \cdot 2 \cdot l_{\text{д}} \cdot I_{\text{ад}}^2 = 0,91 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 27,7^2 = 27,96 \text{ кВт.} \quad (3.62)$$

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_b = R_{\text{пр}} \cdot 2 \cdot I_{\text{д}} \cdot I_{b\text{д}}^2 = 0,91 \cdot 2 \cdot 20 \cdot 27,7^2 = 27,96 \text{ кВт.} \quad (3.63)$$

$$\Delta P_c = \frac{R_p}{2} \cdot 2 \cdot I_{\text{д}} \cdot I_{c\text{д}}^2 = \frac{0,16}{2} \cdot 2 \cdot 20 \cdot 27,7^2 = 2,46 \text{ кВт.} \quad (3.64)$$

Відповідні сумарні втрати потужності в усій лінії

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_c = 27,96 + 27,96 + 2,46 = 58,38 \text{ кВт.} \quad (3.46)$$

Порівняння визначених показників ефективності передачі електроенергії по лінії ДПР в режимах консольного та двостороннього живлення представлено у графічній формі на рис. А6 в додатку А. Узагальнено можна констатувати покращення визначених показників ефективності передачі електроенергії за рахунок забезпечення режиму двостороннього живлення при одночасному зниженні втрат активної потужності в лінії майже вдвічі. У цьому контексті варто зауважити, що у процесі економічного обґрунтування доцільності впровадження режиму двостороннього живлення окремо розглянутої лінії ДПР із застосуванням фазоповоротного пристрою необхідно додатково враховувати також як вартість втрат електроенергії в зазначеному пристрої, так і додатковий переток реактивної потужності викликаний його наявністю. Приклад таких розрахунків наведено в [3].

### 3.5 Висновки до розділу 3

1. Прогностичне моделювання на основі фундаментальних положень теорії лінійних електричних кіл дозволяє як передбачати вплив заходів щодо підвищення ефективності передачі електроенергії по лініях ДПР на основні показники процесу, так і створює основу для обґрунтування економічної ефективності зазначених заходів.

2. Результати обчислень на дослідній ділянці показали, що в режимі консольного живлення серед обраних ключових показників ефективності процесу передачі енергії по лінії ДПР передусім потребує покращення значення

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнту несиметрії лінійних напруг на споживачі за зворотною послідовністю. Впровадження режиму двостороннього живлення дозволяє знизити величину зазначеного коефіцієнта від значення у 3,3 % до 2,49 %, що все ж перевищує унормоване значення у 2 %. Тобто можна констатувати, що попри позитивний вплив від забезпечення режиму двостороннього живлення на ступінь несиметрії напруги на споживачі, застосування виключно цього технічного заходу не гарантує нормалізації відповідного показника якості електроенергії.

3. У разі застосування режиму двостороннього живлення суттєво покращується режим напруги на споживачі. Зокрема сталі відхилення напруги на споживачі по результатах обчислень зменшилося від 5,59 % до 4,45 % що не перевищує допустимого значення 5 %.

4. Одночасно обчислення показали, що при двосторонньому живленні втрати активної потужності у досліджуваній лінії знижуються до 58,38 кВт у порівнянні зі значенням 116,74 кВт в режимі одностороннього живлення.

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Як підсумок проведених у роботі досліджень у відповідності до [24] вважаємо доцільним сформулювати наступні висновки та рекомендації.

1. Пошук нових шляхів підвищення ефективності процесів передачі електроенергії через електричні мережі є важливим завданням для електроенергетичної галузі України оскільки саме енергоефективність стає ключовим фактором у подоланні проблем нестачі генеруючих потужностей та обмеженості передавальних спроможностей систем розподілу через вихід з ладу значної кількості електричного обладнання.

2. Інтеграція електричних мереж України до енергетичної системи Європейського Союзу обумовлює необхідність розгляду питань підвищення енергоефективності у нерозривному взаємозв'язку з питаннями забезпечення електромагнітної сумісності та підвищення показників якості електроенергії у вітчизняних електромережах.

3. Особливо яскраво згаданий вище зв'язок простежується в електричних мережах з одностороннім живленням характерним прикладом яких є лінії типу «два проводи – рейка» котрі використовують для живлення нетягових споживачів на ділянках залізниць України електрифікованих за системою тяги змінного струму. Аналіз конструктивних особливостей зазначених мереж а також наявних на сьогодні наукових досліджень з відповідної тематики свідчить, що найбільші складності виникають у забезпеченні відповідності режиму напруги у місцях приєднання споживачів як з точки зору допустимого відхилення напруги, так і несиметрії трифазної системи а також у збільшених втратах електричної енергії в лінії.

4. Тому у даній роботі запропоновано основними критеріями ефективності процесу передачі електричної енергії у лініях ДПР вважати стале відхилення напруги на споживачі, коефіцієнт несиметрії лінійних напруг на споживачі за зворотною послідовністю та втрати активної потужності в лінії.

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. Порівняння відомих на сьогодні шляхів модернізації систем живлення споживачів ліній ДПР показує, що одним з перспективних напрямків поліпшення вищезгаданих показників ефективності передачі електроенергії у лініях ДПР є реалізація режиму двобічного живлення зазначених ліній через фазоповоротний пристрій.

6. Прогнозування впливу впровадження режиму двостороннього живлення на значення показників ефективності передачі електроенергії на дослідній ділянці здійснено шляхом виконання аналітичних розрахунків на основі класичних положень теорії лінійних електричних кіл із зосередженими параметрами в усталеному режимі. Їх результати показують, що у порівнянні з існуючою схемою консольного живлення реалізація двобічного режиму живлення даної ділянки через фазоповоротний пристрій дозволяє зменшити стале відхилення напруги на споживачі майже в 1,26 рази, знизити коефіцієнт несиметрії лінійних напруг на споживачі за зворотною послідовністю в 1,33 рази при одночасному зниженні удвічі втрат активної потужності в лінії.

7. На нашу думку, найбільш перспективним напрямком подальших досліджень є пошук ефективного комплексу заходів щодо зменшення несиметрії напруг на споживачах ліній ДПР. Виконані розрахунки свідчать про те, що на відміну від інших показників, виключно запровадженням режиму двостороннього живлення неможливо гарантовано досягти зменшення коефіцієнту несиметрії напруги до унормованих значень. Слід відзначити, що у даній роботі прогнозування значень коефіцієнту несиметрії при різних режимах роботи дослідної ділянки здійснювалося виключно на основі врахування конструктивних особливостей самої лінії ДПР та електричних навантажень нетягових та тягових споживачів. При цьому можлива несиметрія напруг на шинах тягової підстанції також може спричиняти додатковий негативний вплив на згаданий показник.

8. Можна також передбачати, що у майбутньому із більш широким впровадженням сучасних типів електрорухомого складу з тяговими асинхронними двигунами та силовими частотними перетворювачами на

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

залізницях України зросте актуальність досліджень впливу несинусоїдності струмів тягової мережі на ефективність передачі енергії по лініях ДПР, що у свою чергу спричинятиме необхідність розширення кола основних показників ефективності вказаного процесу.

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бекян Г.О., Бекян Д.Г. Реконструкція електричних мереж в Україні. *Сталий розвиток міст 2020. Ч2. Транспорт і освітлення*: зб. тез доп. всеукр. наук.-техн. конф., м Харків, 21-23 квіт. 2020 р. Харків, 2020. С. 79–81.
2. Писаренко О.В. Ефективність передачі електроенергії у мережі середньої напруги з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів. *Наука і сталий розвиток транспорту*: збірник тез доповідей всеукр. наук.-техн. конф. студентів і молодих учених, м. Дніпро, 27 лист. 2024 р. Дніпро, 2024. Т.Ш. С. 101.
3. Земський Д.Р. Підвищення ефективності передачі електроенергії для нетягових споживачів електрифікованих залізниць змінного струму : дис. ... д-ра філософії : 275. Дніпро, 2020. 194 с.
4. Енергетична ефективність України. Кращі проектні ідеї: проект «Професіоналізація та стабілізація енергетичного менеджменту в Україні» / уклад.: С.П. Денисюк, О.В. Коцар, Ю.В. Чернецька. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. 79 с.
5. Про ринок електричної енергії : Закон України від 13.04.2017 р. № 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (дата звернення 10.01.2025).
6. Правила ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку : По-станова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №308. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18> (дата звернення: 01.02.2019).
7. Про затвердження Кодексу комерційного обліку електричної енергії : Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №311. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0311874-18> (дата звернення: 01.02.2019).
8. Про затвердження Кодексу систем розподілу: Затв.: Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №310. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Про затвердження Правил ринку. Затв: Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №307. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

11. Про затвердження Правил роздрібного ринку електричної енергії : Затв.: Постанова Нацком. енергетики, ком. послуг. від 14.03.2018 №312. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

12. Про затвердження Порядку забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій споживачам за їх недотримання: Затв.: Постанова Нац. ком. енергетики, ком. послуг. від 12.06.2018 №375. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0375874-18> (дата звернення: 01.02.2019).

13. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). Чинний від 2014-10-01. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2014. 32 с.

14. Стратегія сталого розвитку «Україна – 2020»: Затв.: Указ Президента України від 12 січня 2015 р. № 5 /2015. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5/2015> (дата звернення: 01.02.2019).

15. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»: Схвалено : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 17 серпня 2017 р. № 605 р. Київ : Міністерство енергетики України, 2017. 66 с. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text> (дата звернення 10.01.2025).

16. Аналіз роботи господарства електрифікації та електропостачання в 2015 р.: Київ : 2016. 148 с.

17. Загальноукраїнська інформація та статистична інформація європейських інституцій у сфері електричної енергії : веб-сайт Нацком. енергетики, ком. послуг. Режим доступу: URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=39939> (дата звернення: 01.06.2019).

18. Статистична інформація [Електронний ресурс] : веб-сайт М-ва. енерг. та вугіл. пром. URL:

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat\\_id=35081](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/officialcategory?cat_id=35081)

(дата звернення: 01.02.2019).

19. Сиченко В. Г., Сасенко Ю. Л., Босий Д. О. Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія. Дніпропетровськ: Стандарт-Сервіс, 2015. 340 с.

20. Електропостачання промислових підприємств залізничного транспорту: навч. посіб. для вузів / Бондар І. Л., Бондар О. І., Сиченко В. Г., Остапчук О. В. Дніпропетровськ : Маковецький, 2012. 286 с.

21. Бондар І. Л., Бондар О. І., Сиченко В. Г. Електричні системи та мережі нетягових споживачів залізничного транспорту : навч. посібник для вузів. Дніпропетровськ: Маковецький, 2009. 184 с.

22. Bosyi D., Zemskyi D. Increasing Power Supply Efficiency for “Two WireRail” Line Consumers. *Problemy Kolejnictwa*. 2020. .Issue 188. pp. 93-102. . URL: <https://doi.org/10.36137/1881E> (дата звернення 10.01.2025).

23. ДСТУ 13109-97. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. Чинний від 2000-01-01. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1999. 32 с.

24. Дослідження та оптимізація систем енергопостачання: навч. посіб. / за ред. Д.О. Босого. Дніпро : УДУНТ, 2023. 120 с.

					02.15.EE2326.KPM.2025-ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### СПИСОК ГРАФІЧНИХ РОБІТ

- 1) Однолінійна схема тягової підстанції дослідної ділянки;
- 2) Схема електропостачання ділянки;
- 3) Векторні групи трансформаторів;
- 4) Результати моделювання.

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А  
Графічні роботи

					02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

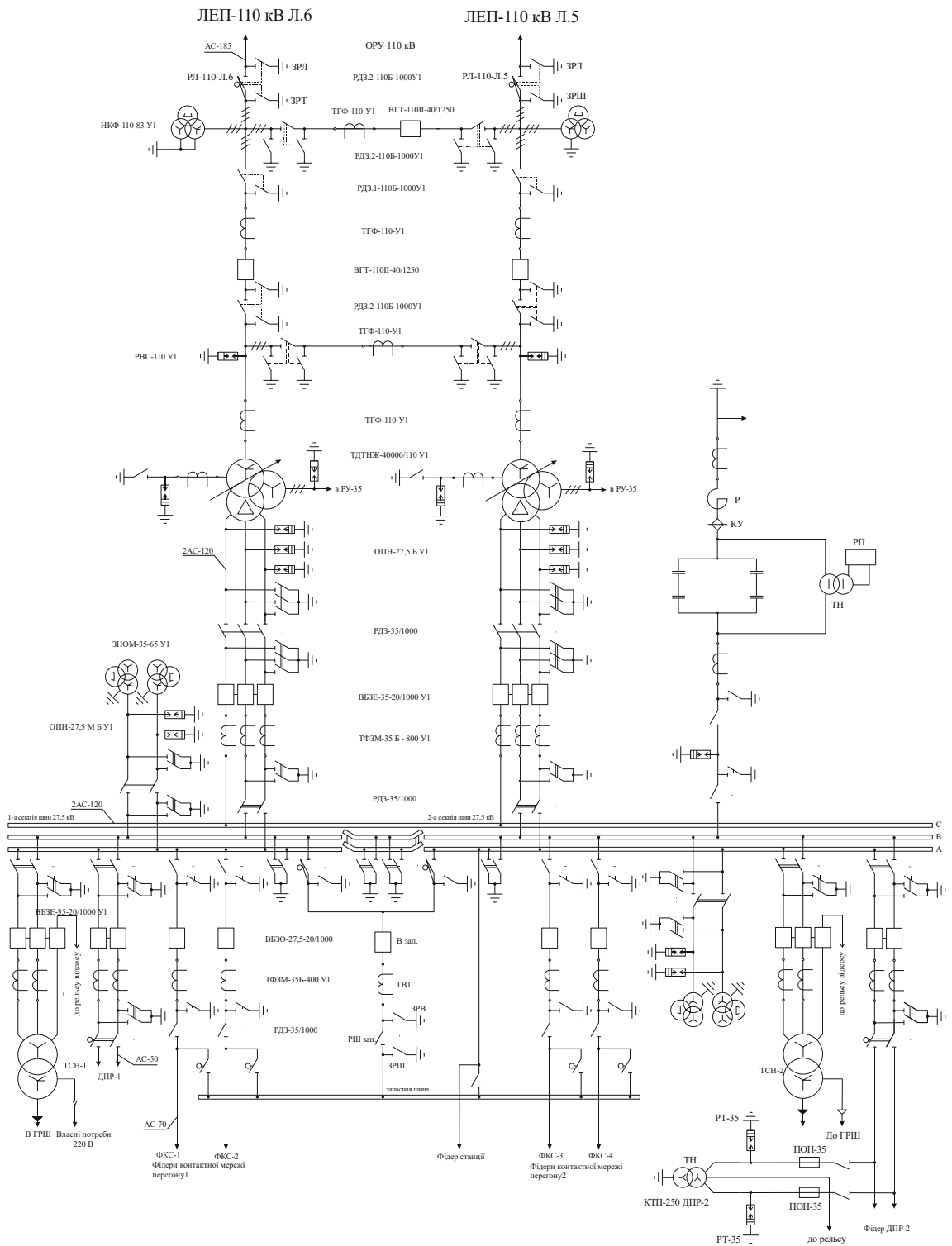
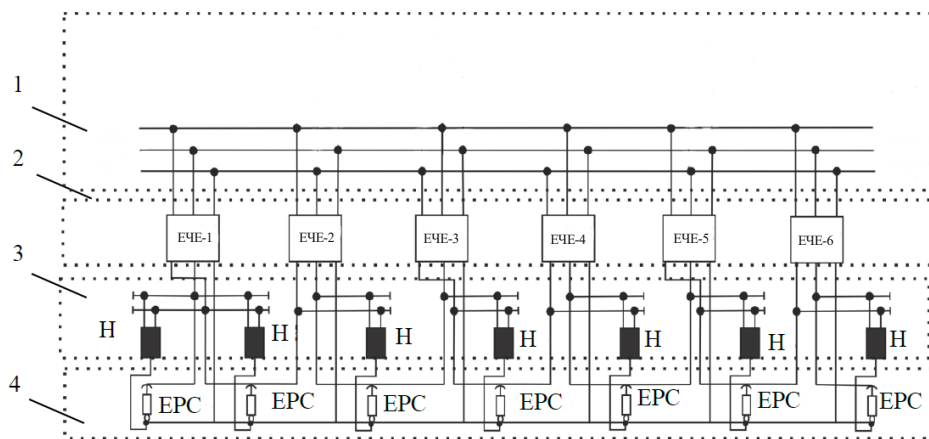


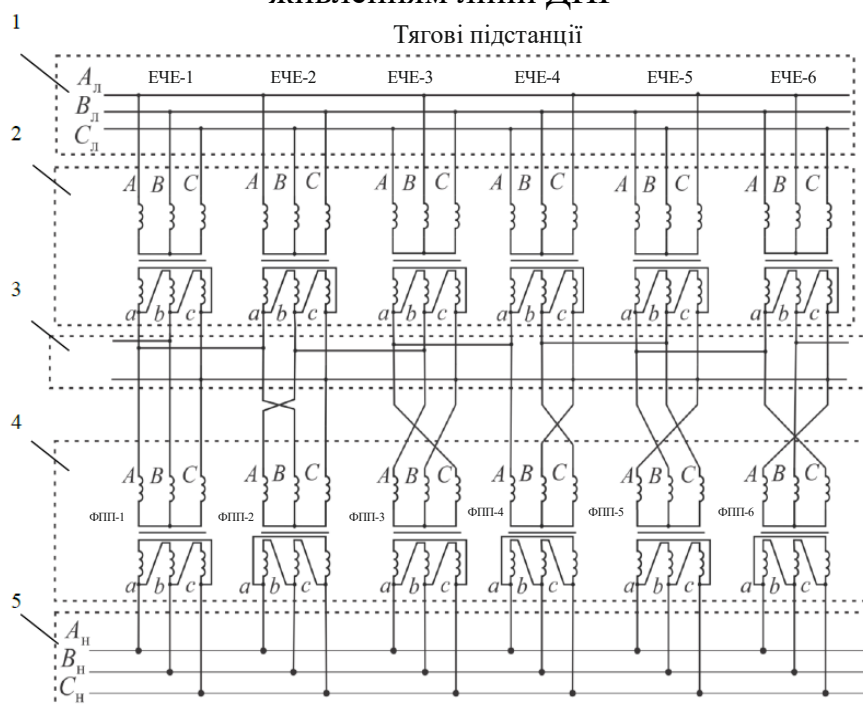
Рисунок А.1 - Однолінійна схема тягової підстанції дослідної ділянки

					Однолінійна схема тягової підстанції дослідної ділянки		
					Ефективність передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів		
					Літ.	Маса	Масштаб
							1 : 1
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Арк. 65    Аркушів 68		
Розроб.		Писаренко О.В.			МОН України. УДУНТ Кафедра ІСЕ, група ЕЕ2326		
Перевір.		Земський Д.Р.					
Т. Контр.							
Реценз.							
Н. Контр.		Потапчук І.Ю.					
Затверд.		Босий Д.О.			Додаток А 02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ		



1 – система зовнішнього електропостачання; 2 – тягові підстанції (ЕЧЕ); 3 – проводи лінії ДПР та еквівалентне нетягове навантаження (Н); 4 – тягова мережа та еквівалентне тягове навантаження (Е)

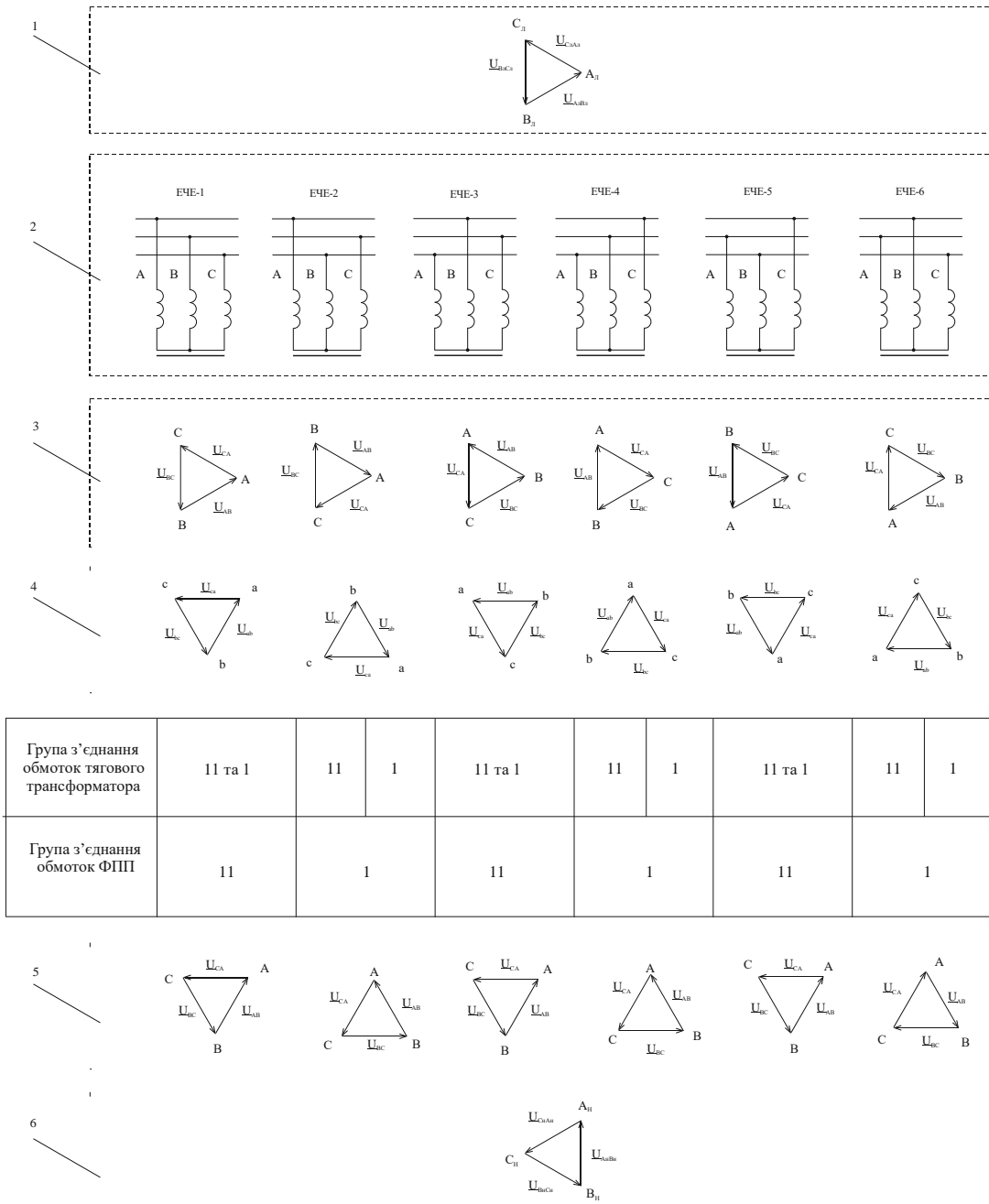
Рисунок А.2 – Схема електропостачання ділянки із консольним живленням ліній ДПР



1 – схеми підключення тягових підстанцій (ЕЧЕ) до мережі загального призначення; 2 – схеми тягових трансформаторів підстанцій; 3 – схеми підключення тягової мережі та фазоповоротних пристроїв до тягової обмотки трансформаторів; 4 – фазоповоротні пристрої; 5 – схеми приєднання лінії ДПР 27,5 кВ до фазоповоротних пристроїв

Рисунок А.3 – Схема електропостачання ділянки із застосуванням ФПП

Схема електропостачання ділянки				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Писаренко О.В.		
Перевір.		Земський Д.Р.		
Т. Контр.				
Реценз.				
Н. Контр.		Потапчук І.Ю.		
Затверд.		Босий Д.О.		
Ефективність передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів				
			Літ.	Маса
			Арк. 66	Аркушів 68
Додаток А 02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ				
МОН України. УДУНТ Кафедра ІСЕ, група ЕЕ2326				



Група з'єднання обмоток тягового трансформатора	11 та 1	11	1	11 та 1	11	1	11 та 1	11	1
Група з'єднання обмоток ФПП	11	1		11	1		11	1	

1 – вектори лінійних напруг системи зовнішнього електропостачання; 2 – схема підключення первинної обмотки тягового трансформатора до зовнішньої мережі, 3,4 – вектори напруги на первинних та на вторинних обмотках тягових трансформаторів; 5 – вектори напруг первинної обмотки ФПП; 5 – векторна діаграма напруг у лінії нетягового електропостачання (ДПР)

Рисунок А.4 – Векторні діаграми напруг системи живлення ліній ДПР із застосуванням ФПП

					Векторні групи трансформаторів				
					Ефективність передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				Літ.	Маса
Розроб.		Писаренко О.В.					1 : 1		
Перевір.		Земський Д.Р.							
Т. Контр.					Арк.	67	Аркушів 68		
Реценз.					Додаток А 02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ				
Н. Контр.		Потапчук І.Ю.						МОН України. УДУНТ Кафедра ІСЕ, група ЕЕ2326	
Затверд.		Босий Д.О.							

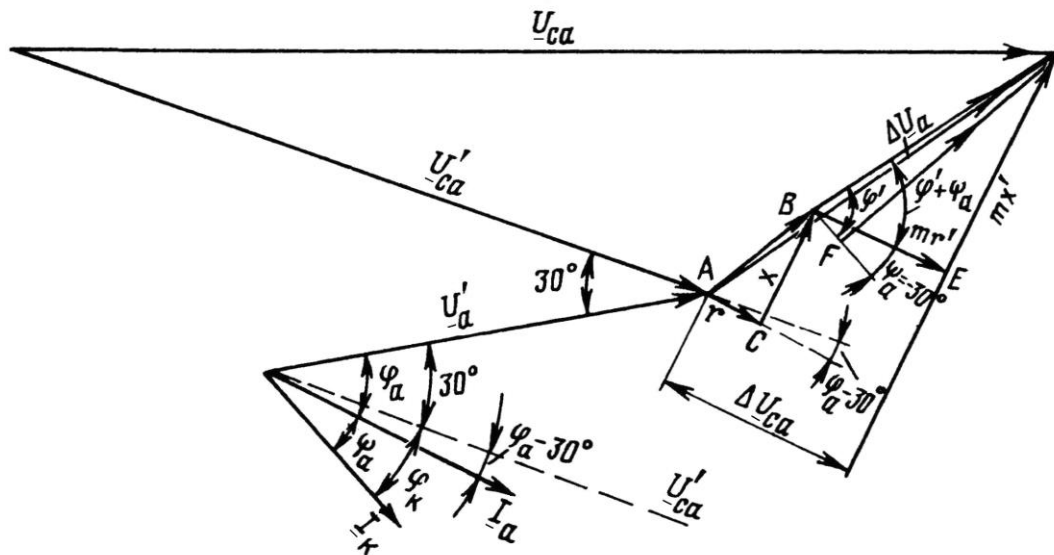
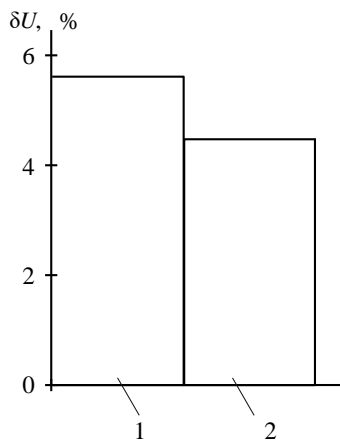


Рисунок А.5 – Векторна діаграма напруг і струмів у лінії ДТР

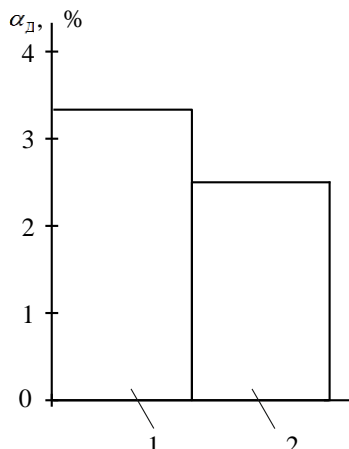
Стале відхилення напруги на споживачі

$$\delta U = \frac{U_{\text{ном}} - U_y}{U_{\text{ном}}} \cdot 100$$



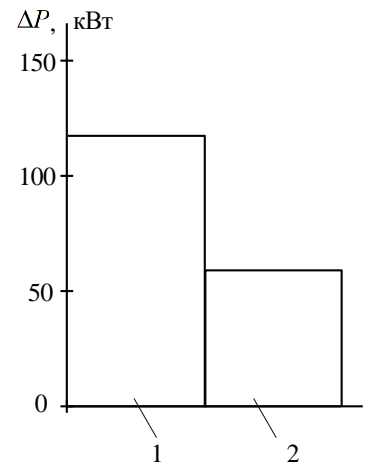
Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю

$$\alpha_D \approx |\Delta U_{\text{зв}}| \cdot 100 / U_{\text{ном}}$$



Сумарні втрати потужності у фазах лінії ДТР

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_c$$



1 – значення показника у режимі консольного живлення,  
2 – значення показника у режимі двостороннього живлення

Рисунок А.6 – Прогнозовані значення основних показників ефективності передачі електроенергії у лінії ДТР в режимі консольного та двостороннього живлення

					Результати моделювання			
					Ефективність передачі електроенергії у мережі з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів	Літ.	Маса	Масштаб
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Додаток А 02.15.ЕЕ2326.КРМ.2025-ПЗ			1 : 1
Розроб.		Писаренко О.В.						
Перевір.		Земський Д.Р.						
Т. Контр.						Арк. 68	Аркушів 68	
Реценз.						МОН України. УДУНТ Кафедра ІСЕ, група ЕЕ2326		
Н. Контр.		Потапчук І.Ю.						
Затверд.		Босий Д.О.						