

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Управління електричними процесами

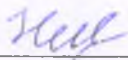
Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
магістра

на тему: Оцінка наслідків кондуктивного впливу тягової мережі 27.5 кВ на якість електроенергії

за освітньою програмою Електротехнічні системи електроспоживання  
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електроенергетика та електромеханіка

Виконав: студент групи: EC2121



Назар БОРЕЙКО

Керівник:



зав. каф. Дмитро БОСИЙ

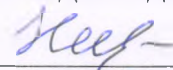
Нормоконтролер:



доцент Віталій ПЕРЦЕВИЙ

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

Студент



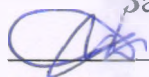
Дніпро – 2022 рік

**Міністерство освіти і науки України**  
**Український державний університет науки і технологій**

1. Факультет: Управління енергетичними процесами
2. Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання
3. Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)
4. Освітня програма: Електротехнічні системи електроспоживання
5. Спеціальність: 144 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ICE

 Дмитро БОСІЙ

Дата 05.09.22

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу

магістр з електротехнічних систем  
електроспоживання

студенту БОРЕЙКУ Назару Олександровичу

1. Тема роботи: Оцінка наслідків кондуктивного впливу тягової мережі 27.5 кВ на якість електроенергії

Керівник роботи: Босій Дмитро Олексійович, д.т.н., доцент

(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від

"14" 04 2022 р.

№ 318ст

2. Строк подання студентом роботи: 12.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Впливи в тяговій мережі змінного струму

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

4.1 Аналітична частина: Електромагнітний вплив системи електропостачання змінного струму на якість електропостачання

4.2 Основна частина:

Математичні моделі для дослідження спотворень якості електричної енергії для систем тягового електропостачання змінного струму

Експериментальні дослідження якості електроенергії у споживача, який живиться від електричної мережі залізниці

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

Принципова схема електропостачання змінного струму

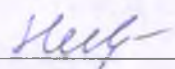
6. Консультанти розділів роботи:

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Завдання видав:<br>(підпис консультанта, дата) | Завдання прийняв:<br>(підпис студента, дата) |
|--------|-------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|        |                                           |                                                |                                              |
|        |                                           |                                                |                                              |
|        |                                           |                                                |                                              |
|        |                                           |                                                |                                              |

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

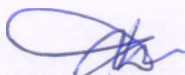
| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи                                                                                            | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1     | Електромагнітний вплив системи електропостачання змінного струму на якість електропостачання                                   | 04.10.2022                    | 35 %     |
| 2     | Математичні моделі для дослідження спотворень якості електричної енергії для систем тягового електропостачання змінного струму | 27.10.2022                    | 30 %     |
| 3     | Експериментальні дослідження якості електроенергії у споживача, який живиться від електричної мережі залізниці                 | 20.11.2022                    | 30 %     |
| 4     | Подання кваліфікаційної роботи до кафедри                                                                                      | 12.12.2022                    | 5 %      |

Студент



Назар БОРЕЙКО

Керівник роботи



Дмитро БОСИЙ

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                                                         | 7  |
| 1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ВПЛИВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....                                              | 9  |
| 1.1 Класифікація електромагнітних перешкод .....                                                                                                   | 9  |
| 1.2 Специфіка влаштування систем тягового електропостачання змінного струму.....                                                                   | 15 |
| 1.3 Історія виникнення та застосування системи електричної тяги 27,5 кВ .....                                                                      | 19 |
| 1.4 Спотворення якості електричної енергії які викликаються електромагнітними процесами в системі тягового електропостачання змінного струму ..... | 21 |
| 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ .....            | 27 |
| 2.1 Оцінка несинусоїдності струмів за допомогою активних та обмінних характеристик електротягового навантаження .....                              | 27 |
| 2.1 Дослідження несиметрії в системах електричної тяги методом фазних координат .....                                                              | 30 |
| 2.3 Методика імітаційного моделювання в програмному комплексі «iSET» .....                                                                         | 38 |
| 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У СПОЖИВАЧА, ЯКИЙ ЖИВИТЬСЯ ВІД ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЦІ .....                            | 49 |
| 3.1 Схема проведення дослідження .....                                                                                                             | 49 |
| 3.2 Режими роботи системи електропостачання залізниці.....                                                                                         | 50 |
| 3.3 Обробка та аналіз результатів дослідження.....                                                                                                 | 51 |
| ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....                                                                                                                      | 63 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....                                                                                                                              | 64 |

|           |      |               |                      |          |                                                                                                    |                             |       |         |
|-----------|------|---------------|----------------------|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------|---------|
|           |      |               |                      |          | 02.15.ЕС2121.КРМ.2022 - ПЗ                                                                         |                             |       |         |
| Зм.       | Арк. | № документа   | Підпис               | Дата     | Оцінка наслідків кондуктивного впливу тягової мережі 27.5 кВ <sup>М</sup> на якість електроенергії | Літера                      | Аркуш | Аркушів |
| Розробив  |      | Борейко Н.О.  | <i>Н.О. Борейко</i>  |          |                                                                                                    | Д                           |       |         |
| Консульт. |      |               |                      |          |                                                                                                    |                             | 6     | 65      |
| Керівник  |      | Босий Д.О.    | <i>Д.О. Босий</i>    | 19.12.22 |                                                                                                    | МОНУДУНТ, ІСЕ<br>ГР ЕС 2121 |       |         |
| Н контр   |      | Перцевий В.О. | <i>В.О. Перцевий</i> |          |                                                                                                    |                             |       |         |
| Зав. каф  |      | Босий Д.О.    | <i>Д.О. Босий</i>    | 19.12.22 |                                                                                                    |                             |       |         |

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 64 сторінок, складається із 3 розділів та містить 38 ілюстрації, 7 таблиць, 11 використаних джерела.

Об'єкт дослідження – кондуктивні перешкоди в системі тягового електропостачання змінного струму.

Метою роботи є оцінка впливу наслідків кондуктивного впливу. До негативних впливів відноситься несинусоїдність та несиметрія в системі електропостачання змінного струму. Для досліджень застосовується методика оцінки несинусоїдності струмів за допомогою активних та обмінних характеристик електротягового навантаження. Несиметрія навантажень досліджується за допомогою методу фазних координат.

Методи досліджень – використання активних та обмінних характеристик; розрахунок методом фазних координат.

Отримані результати показують, що якість електропостачання нетягових споживачів можна підвищити шляхом зменшення несиметрії та несинусоїдності напруги у місці приєднання до лінії «два проводи-рейка» споживача.

Ключові слова: КОНДУКТИВНИЙ ВПЛИВ, СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ, СПОТВОРЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, МЕТОД ФАЗНИХ КООРДИНАТ, ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                                                                                                                         | 7  |
| 1. ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ВПЛИВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....                                               | 9  |
| 1.1 Класифікація електромагнітних перешкод.....                                                                                                    | 9  |
| 1.2 Специфіка влаштування систем тягового електропостачання змінного струму .....                                                                  | 15 |
| 1.3 Історія виникнення та застосування системи електричної тяги 27,5 кВ .....                                                                      | 19 |
| 1.4 Спотворення якості електричної енергії які викликаються електромагнітними процесами в системі тягового електропостачання змінного струму ..... | 21 |
| 2. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ .....            | 27 |
| 2.1 Оцінка несинусоїдності струмів за допомогою активних та обмінних характеристик електротягового навантаження .....                              | 27 |
| 2.1 Дослідження несиметрії в системах електричної тяги методом фазних координат .....                                                              | 30 |
| 2.3 Методика імітаційного моделювання в програмному комплексі «iSET».....                                                                          | 38 |
| 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У СПОЖИВАЧА, ЯКИЙ ЖИВИТЬСЯ ВІД ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЦІ .....                            | 49 |
| 3.1 Схема проведення дослідження.....                                                                                                              | 49 |
| 3.2 Режими роботи системи електропостачання залізниці .....                                                                                        | 50 |
| 3.3 Обробка та аналіз результатів дослідження .....                                                                                                | 51 |
| ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....                                                                                                                     | 63 |
| СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                                                 | 64 |

|            |      |               |        |      |                                                                                       |        |        |         |
|------------|------|---------------|--------|------|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|--------|---------|
|            |      |               |        |      | 02.15.ЕС2121.МР.2022 - ПЗ                                                             |        |        |         |
| Змн.       | Арк. | № докум.      | Підпис | Дата |                                                                                       |        |        |         |
| Розробив   |      | Борейко Н.О.  |        |      | Оцінка наслідків кондуктивного впливу тягової мережі 27.5 кВ на якість електроенергії | Літера | Аркуш. | Аркушів |
| Консультат |      |               |        |      |                                                                                       |        | 6      | 64      |
| Керівник   |      | Босий Д.О.    |        |      |                                                                                       |        |        |         |
| Н контр    |      | Перцевий В.О. |        |      |                                                                                       |        |        |         |
| Зав. каф   |      | Босий Д.О.    |        |      |                                                                                       |        |        |         |

## ВСТУП

Злагоджена робота транспорту необхідна для розвитку країни. Для злагодженої роботи транспорту необхідно підтримувати транспортну інфраструктуру в належному стані, для цього потрібно постійно докладати зусиль. Система електропостачання змінного або постійного струму має свої переваги та недоліки. Для того щоб вдосконалювати галузь залізничних перевезень потрібно проводити дослідження, системно аналізувати результати, а для цього використовувати сучасні методи моделювання. На сьогодні найбільш поширеними методами моделювання є математичне та імітаційне методи моделювання. Вони дають змогу оцінити вплив негативних чиників на інфраструктуру залізничного транспорту.

**Актуальність роботи.** В системі тягового електропостачання змінного струму присутні різні види спотворень. Важливо, щоб система електропостачання змінного струму працювала в надійному режимі. В теперішніх умовах споживання електроенергії збільшується і для споживачів потрібно, щоб якість електроенергії забезпечувалась на необхідному рівні. Неякісний показник того чи іншого параметру може призвести до виходу обладнання з роботи.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

На підставі проведених досліджень встановлено, що роздільне живлення тягового і районного навантаження за допомогою двох трансформаторів забезпечує відповідність показників несиметрії та спотворення синусоїдності напруги встановленим вимогам.

**Мета і завдання роботи.** Метою роботи є дослідження процесів, які протікають в тяговій мережі змінного струму та впливають на якість електроенергії. Завданням в даній дипломній роботі було дослідити можливі впливи в системі електропостачання змінного струму.

**Апробація результатів роботи.** Результати роботи доповідались на 14-й Міжнародній науково-практичній конференції студентів та молодих вчених «Сучасні транспортні технології», яка відбулася у м. Львів 08 грудня 2022 р.

### **Публікації**

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

Борейко Н.О., Оцінка наслідків кондуктивного впливу тягової мережі 27.5 кВ на якість електроенергії / Транспортна інженерія: тез доп 14 - ї наук.-прак. конф. студ. і мол. вчен., 2022, ЛІ УДУНТ, 2022р. 103-104 с.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

# 1.ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ВПЛИВ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

## 1.1 Класифікація електромагнітних перешкод

Електромагнітна перешкода, що проявляється в погіршенні робочих показників технічних засобів, спричинених електромагнітним обуренням, може фігурувати практично будь-яке електромагнітне явище у широкому діапазоні частот.

У випадку технічний засіб (електронні системи, електроенергетичні об'єкти, електричні прилади, радіоелектронна апаратура та ін.) призначено для того, щоб за певних умов експлуатації протягом терміну його використання реалізовувати необхідну функцію. Можна сказати, що пристрої постійно піддаються електричним та неелектричним впливам, і, з іншого боку, самі надають електричні та неелектричні впливи на навколишню середу.

При взаємодії з рецептором перешкод утворюється негативний прояв перешкоди. Для джерел та приймачів перешкод можуть мати різні механізми зв'язку. Загальне уявлення про принципово можливі механізми зв'язку джерел та приймачів перешкод наведено на рисунку 1.1.

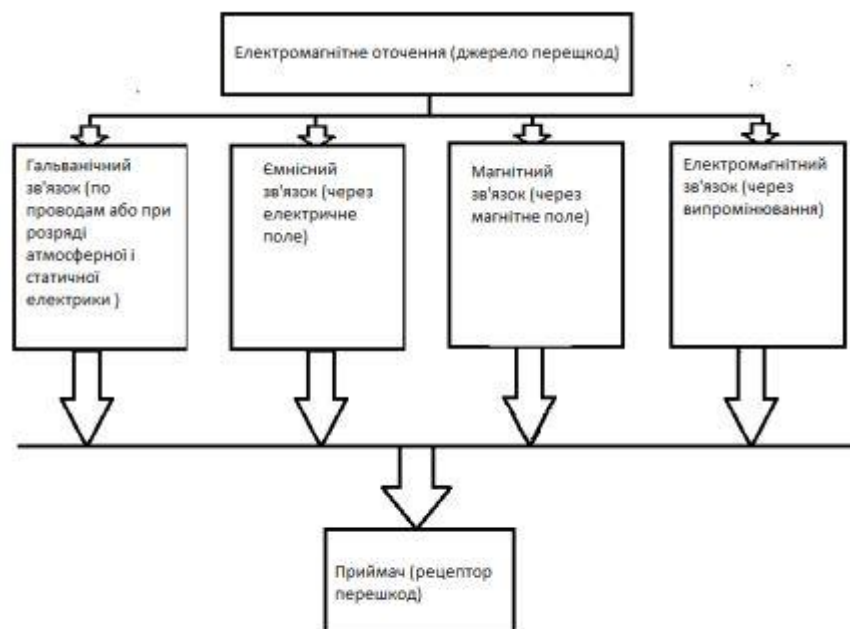


Рисунок 1.1 - Механізми зв'язку джерел та приймачів перешкод

Гальванічний зв'язок реалізується через струм чи напругу. Ємнісні та магнітні зв'язки здійснюються за допомогою електричного або магнітного поля, які є незалежними один від одного. Зв'язок через випромінювання здійснюється у разі, коли приймач перебуває в «дальшій зоні», а складові електромагнітного поля (електричне та магнітне) пов'язані між собою та надають взаємний вплив один на одного.

Крім механізмів зв'язку розрізняють шляхи зв'язку. Електромагнітні перешкоди можуть проникати в пристрій або, навпаки, передаватися в довкілля різними шляхами:

- у вигляді гальванічного зв'язку через мережу електропостачання, інформаційні входи та виходи, через систему заземлення, через розряди атмосферної або статичної електрики, так звані кондуктивні перешкоди;
- у вигляді ємнісного (електричного), індуктивного (магнітного) зв'язків через відповідні поля в навколишньому просторі, так звані індуктивні перешкоди.

Залежно від джерела електромагнітні перешкоди можна поділити на природні та штучні. Найбільш поширеними природними електромагнітними перешкодами є електромагнітні імпульси під час удару блискавки. Штучні перешкоди можна розділити на створювані функціональними джерелами та створювані дисфункціями. Функціональним джерелом перешкод будемо називати джерело, якщо йому самого створювана електромагнітна перешкода є корисним сигналом. До таких джерел належать, перш за все, передавальні пристрої радіозв'язку, а також апаратура, що використовує ланцюги живлення передачі інформації. Нефункціональними будемо називати джерела, які створюють електромагнітні перешкоди як побічний ефект у процесі роботи. До них можна віднести будь-які провідні комунікації, що створюють електромагнітні поля, комутаційні пристрої, імпульсні блоки живлення апаратури та ін. Електростатичний розряд з тіла людини також може розглядатися як створювані нефункціональним джерелом електромагнітні перешкоди. Важливе відмінність між функціональними та нефункціональними джерелами полягає в тому, що для нефункціональних рівень електромагнітних

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 10   |

перешкод часто можна знизити шляхом перегляду конструкції джерела, тоді як для функціональних електромагнітних перешкод такий шлях зазвичай виключається.

Класифікація електромагнітних перешкод наведено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 - Класифікація електромагнітних перешкод залежить від джерела перешкод та середовища розповсюдження

Умовність поділу перешкод на індуктивні та кондуктивні наочно проявляється, наприклад, у ході аналізу шляху проникнення високочастотних перешкоди всередину електронної апаратури. Часто з'ясовується, що реальний шлях проникнення перешкоди є комбінацією металевих провідників та «доріжок» на платах апаратури («кондуктивні» ділянки) та паразитних ємнісних та індуктивних зв'язків («індуктивні» ділянки). У результаті перешкода досягає високочутливих цифрових контурів апаратури, мінаючи захисні елементи типу фільтрів та варисторів, встановлені для чисто кондуктивного характеру перешкоди.

Розподіл перешкод на індуктивні та кондуктивні можна вважати щодо суворим лише в низькочастотній (до десятків кілогерців) області, коли ємнісні та індуктивні зв'язки зазвичай малі.

За ступенем впливу на технічні засоби електромагнітні перешкоди можна розділити на такі види перешкод:

1. Перешкода допустима - перешкода, що спостерігається або прогнозована, що задовольняє кількісним критеріям перешкоди та критеріям спільного використання частот.

2. Перешкода небезпечна (шкідлива) – перешкода, яка заважає дії радіонавігаційної служби або інших служб безпеки або суттєво погіршує якість, ускладнює чи неодноразово перериває роботу служби радіозв'язку.

3. Перешкода прийнятна – перешкода з вищим рівнем, ніж та, яка визначається як допустима, і яка узгоджена між двома або кількома адміністраціями без шкоди іншим адміністраціям.

Наступні два способи класифікації перешкод ґрунтуються на їх спектральних характеристиках. По-перше, електромагнітні випромінювання ділять на періодичні, неперіодичні та шуми. Періодичні та неперіодичні перешкоди – на вузькосмугові та широкосмугові. Шуми характеризуються широкосмуговими перешкодами. Незважаючи на значне різноманітність варіантів перешкод за спектральними характеристиками, можна виділити найхарактерніші типи (рисунк 1.3).

До вузькосмугових перешкод зазвичай відносять перешкоди від систем зв'язку несучої частоти, систем живлення змінним струмом тощо. Їх відмінною особливістю є те, що характер зміни перешкоди у часі є синусоїдальним або близьким до нього.

Широкасмугові перешкоди мають суттєво несинусоїдальний характер і зазвичай проявляються у вигляді або окремих імпульсів, або їх послідовності. Для періодичних широкосмугових сигналів спектр складається з великого набору піків на частотах, кратних частоті основного сигналу. Для аперіодичних перешкод спектр є безперервним і описується спектральною густиною.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 12   |

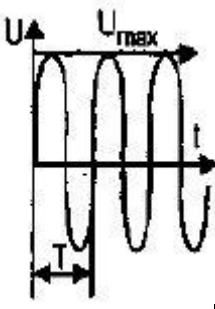
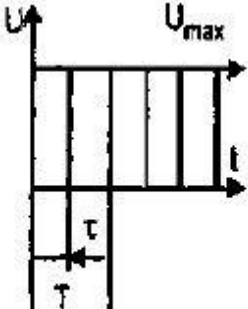
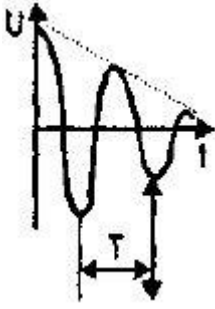
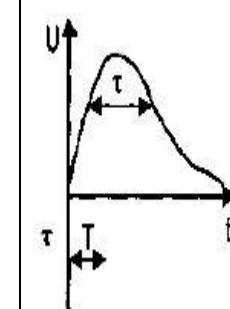
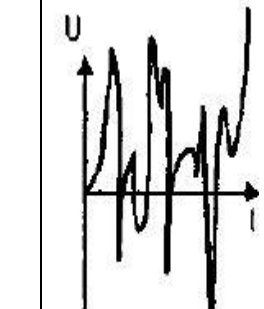
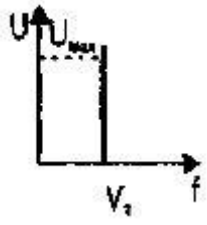
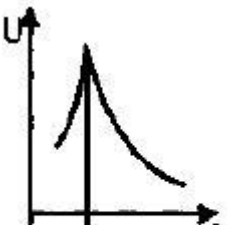
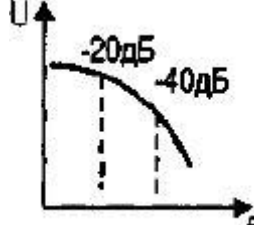
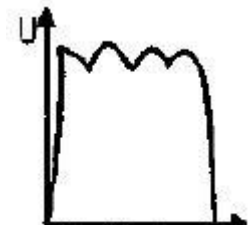
| Періодичні                                                                         |                                                                                    | Неперіодичні                                                                          |                                                                                     | Шуми                                                                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вузькосмугові                                                                      | Широкосмугові                                                                      | Вузькосмугові                                                                         | Широкосмугові                                                                       | Широкосмугові                                                                                   |
| Часова область                                                                     |                                                                                    |                                                                                       |                                                                                     |                                                                                                 |
|   |   |      |   |              |
| Частотна область                                                                   |                                                                                    |                                                                                       |                                                                                     |                                                                                                 |
| Спектральні амплітуди                                                              |                                                                                    | Спектральні густини амплітуд                                                          |                                                                                     |                                                                                                 |
|  |  |     |  |             |
| Радіопередавачі, високочастотні генератори, мережа частотою 50 Гц                  | Тактові імпульси ПЕОМ, тиристорні випрямлячі, іскра запалювання автомобіля         | Комутації в мережах електропостачання, розряди статичної електрики, короткі замикання | Грозові розряди, розряди статичної електрики                                        | Космічний шум, спільна дія іскор запалювання автомобілів на перехресті, корона повітряних ліній |

Рисунок 1.3 - Класифікація електромагнітних перешкод за спектральними характеристиками

Іншою спектральною характеристикою є область частот, у якій лежить переважна більшість спектра перешкоди. Умовно прийнято ділити всі перешкоди на низькочастотні та високочастотні. До перших зазвичай відносять перешкоди в діапазоні 0-9 кГц. У більшості випадків вони створюються силовими електроустановками та лініями. Високочастотні вузькосмугові перешкоди (з частотою

вище 9 кГц) зазвичай створюються різними системами зв'язку. Високочастотними є всі поширені типи імпульсних перешкод. Іноді також запроваджують поняття радіочастотної перешкоди (діапазон – від 150 кГц до 1-2 ГГц) та НВЧ-перешкоди (порядку кількох гігагерц).

Для визначення електромагнітної обстановки всі електромагнітні перешкоди, викликані електромагнітними збуреннями, поділяються на три основні категорії:

- 1) низькочастотні ЕМП (кондуктивні та випромінювані), що викликаються будь-яким джерелом, крім електростатичних розрядів;
- 2) високочастотні ЕМП (кондуктивні та випромінювані), що викликаються будь-яким джерелом, крім електростатичних розрядів;
- 3) електростатичні розряди.

У кожній категорії розглядаються такі види електромагнітних перешкод. Кондуктивні низькочастотні електромагнітні перешкоди:

- 1) гармоніки та інтергармоніки напруги електроживлення;
- 2) напруги сигналів, що навмисно передаються по системах електроживлення;
- 3) коливання напруги електроживлення;
- 4) провали та короткочасні переривання напруги електроживлення;
- 5) несиметрія напруг у трифазних системах електропостачання;
- 6) зміни частоти напруги живлення;
- 7) наведені низькочастотні напруги; постійні складові у мережах електроживлення змінного струму.

Індуктивні низькочастотні електромагнітні перешкоди:

- 1) магнітні поля;
- 2) електричні поля

Кондуктивні високочастотні електромагнітні перешкоди:

- 1) наведені напруги чи струми безперервних коливань;
- 2) аперіодичні перехідні процеси;
- 3) коливальні перехідні процеси.

Індуктивні високочастотні електромагнітні перешкоди:

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 14   |

- 1) магнітні поля;
- 2) електричні поля;
- 3) електромагнітні поля, у тому числі викликані безперервними коливаннями та перехідними процесами;
- 4) електростатичні розряди.

## 1.2 Специфіка влаштування систем тягового електропостачання змінного струму

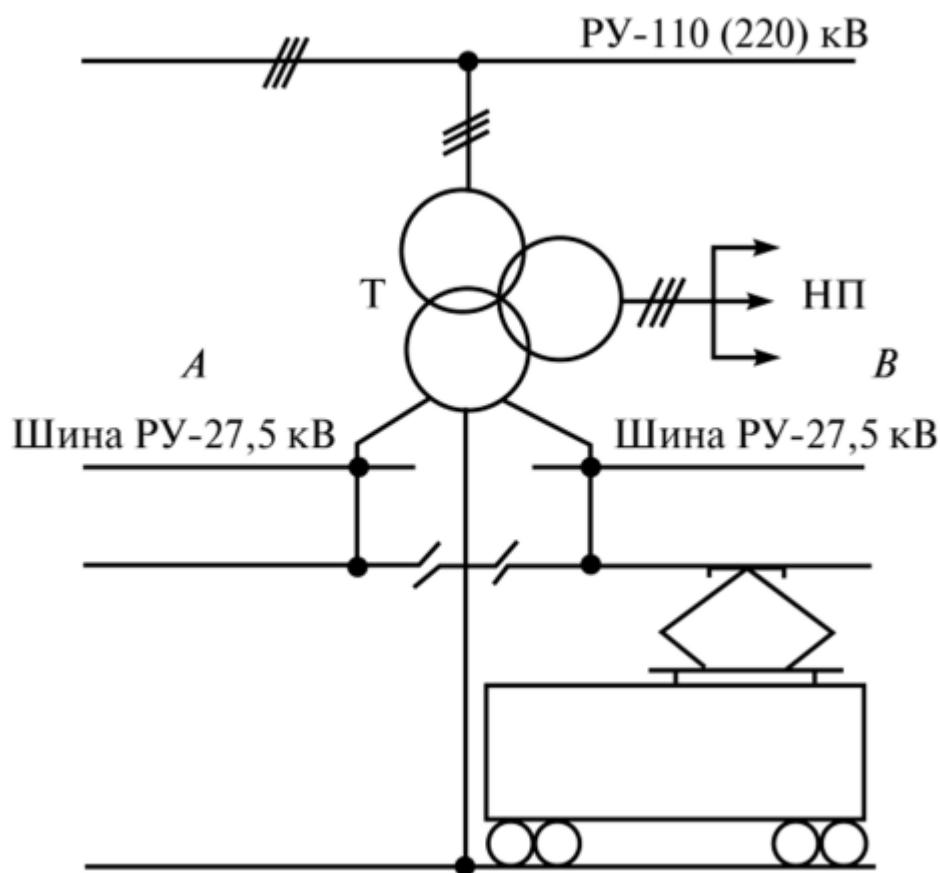


Рисунок 1.4 - Система тягового електропостачання однофазного змінного струму напругою 25 кВ: Т – тяговий трансформатор; НП - нетягові споживачі

Для живлення система тягового електропостачання однофазного змінного струму напругою 25 кВ (рисунок 1.4) в основному використовується трифазна повітряна лінія електропередачі напругою 110, 220 кВ. Головним завданням відкритого розподільного пристрою 110 (220) кВ є передача електроенергії на триобмотувальні трансформатори, які мають два ступені трансформації: для живлення нетягових споживачів безпосередньо від шин тягової підстанції – 35 або

10 кВ та для живлення тягового навантаження та допоміжних пристроїв – 27,5 кВ.

Для живлення контактної мережі використовують фідери. Фідери контактної мережі отримують живлення від фаз А і В розподільного пристрою 27,5 кВ, причому живлення проводиться по різних плечах підстанції. Фаза С з'єднується з рейковим ланцюгом лінією, що відсмоктує, і заземлюється через контур заземлення підстанції. Для запобігання міжфазному замиканню при зміні фаз контактної мережі встановлюється нейтральна вставка.

Власні потреби підстанції забезпечуються через трансформатор потреб, який також підключається до шин РУ-27,5 кВ і знижує напругу до 0,4 кВ.

Основне електропостачання пристроїв СЦБ відбувається аналогічно живленню по системі постійного струму - через трансформатор, що підвищує, СЦБ електроенергія надходить на ПЛ СЦБ, від якої запитуються лінійні трансформатори сигнальних точок автоблокування.

Резервування живлення пристроїв СЦБ та живлення віддалених нетягових споживачів різко відрізняється від електропостачання системою постійного струму. Це пов'язано з тим, що поздовжнє електропостачання в даному випадку виконується за так званою системою ДПР — «два дроти-рейки». Два лінійних дроти цієї системи отримують живлення від фаз А і В розподільного пристрою 27,5 кВ підстанції, а в якості третьої фази використовується рейка.

Резервні однофазні трансформатори сигнальних точок автоблокування в цьому випадку підключаються по черзі до однієї з фаз та рейки.

Відбір потужності для живлення нетягових споживачів виконується за допомогою комплектних трансформаторних підстанцій, які можуть виконуватись у трифазному або однофазному виконанні.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 16   |

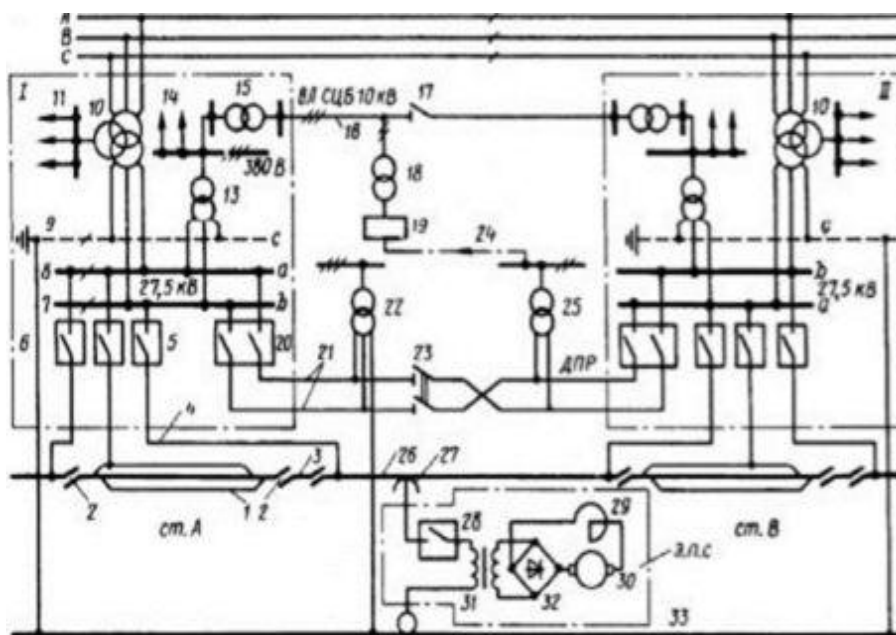


Рисунок 1.5 - Принципова схема ділянки залізниці, електрифікованої за системою змінного струму 25 кВ

На схемі приведена ділянка електрифікованої залізниці (рисунок 1.5) довжиною 40-50 км з двома тяговими підстанціями 1 і 2, розташованими поблизу станцій А і В. До лінії електропередачі трифазного змінного струму 110 кВ підключений понижувальний триобмотувальний трансформатор тяг. Цим трансформатором первинна напруга 110 кВ знижується до 25 кВ, і навіть до 35 чи 10 кВ. Напруга 25 кВ подається на шини (відповідно фази b, a і c) і використовується для живлення тягової мережі, а напруга 35 (або 10) кВ - на шини і використовується для живлення прилеглого до підстанції району.

Для рівномірного завантаження всіх трьох фаз системи зовнішнього електропостачання (їй належить ЛЕП 110 кВ) в тягову мережу станції А і перегону ліворуч від неї подається напруга, що відрізняється по фазі від напруги, що подається в тягову мережу перегону праворуч. Для цього ділянки контактної мережі зазначених перегонів та станції, а також рейки, приєднані до різних фаз шин 27,5 кВ; контактна мережа перегону через фідер контактної мережі і вимикач підключена до шини фази b, контактна мережа станції 1 і перегону зліва від неї до шини фази a, а рейки через рейковий фідер - до шини фази c. При такому підключенні до шин 27,5 кВ з'єднання контактної мережі зліва від станції А з контактною мере-

жею станції струмоприймачами ЕПС , що рухається, можливе, так як вони приєднані до однієї і тієї ж фази а. З'єднання контактної мережі 1 станції і контактної мережі 26 перегону праворуч від підстанції неприпустимо, так як вони приєднані до двох різних фаз а і б. Таке з'єднання призведе до короткого замикання фаз а і б понижуючого трансформатора. Тому ділянки контактної мережі станції 1 і перегону зліва від неї розділені повітряним проміжком, а станції і перегону праворуч - двома повітряними проміжками і нейтральною вставкою між ними . Наявність нейтральної вставки виключає навіть короточасне замикання фаз а і б трансформатора струмоприймачами ЕПС при проході ними цієї ділянки тягової мережі.

Подача напруги в тягову мережу перегону відбувається при включенні вимикача фідер контактної мережі. Після цього машиніст ЕПС може, піднявши струмоприймач і ввімкнувши вимикач, подати змінну напругу на первинну обмотку понижувального тягового трансформатора. Напруга на вторинній обмотці тягового трансформатора випрямляється випрямлячем і через згладжуючий реактор через згладжуючий реактор. , який наводить їх та ЕПС у рух.

У тягову мережу перегону між підстанціями напруга подається від двох підстанцій 1 та 2. При цьому забезпечується двостороннє підведення енергії до ЕПС. Для забезпечення двостороннього живлення ЕПС та рівномірного завантаження фаз ЛЕП 110 кВ знижувальні трансформатори двох сусідніх підстанцій 1 та 2 приєднані до ЛЕП 110 кВ неоднаково, а слідуючи спеціально розробленому правилу.

На малюнку також показано інші допоміжні лінії електропостачання ділянки. Від шин тягової напруги 27,5 кВ одержують живлення також нетягові споживачі. Для цього через вимикач до шин підключають два дроти, що розміщуються на опорах контактної мережі з польової сторони. Знижувальні трансформатори споживачів підключаються до цих дротів та рейки. Така система харчування отримала назву ДПР (два дроти — рейка). У середині лінії ДПР встановлено роз'єднувач . Нормально ліва половина лінії ДПР живиться від підстанції 1, а права -

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 18   |

від підстанції 2, роз'єднувач розімкнеть. У разі потреби (наприклад, при відключенні однієї з підстанцій) вся лінія ДПР може отримувати живлення від однієї підстанції. При цьому роз'єднувач включається.

Енергію для потреб тягової підстанції (живлення ланцюгів управління, сигналізації, освітлення, опалення, моторного навантаження) отримують від трансформатора потреб (ТСН) через шини потреб (на рис 1.5, навантаження своїх потреб позначені стрілками). Від шин власних потреб через трансформатор напруга подається в лінію, призначену для живлення пристроїв СЦБ і зв'язку. Від цієї лінії через малопотужні трансформатори і релейні шафи СЦБ живляться світлофори. У середині лінії встановлений роз'єднувач. Це дає можливість жити лінії від будь-якої з двох підстанцій 1 або 2 (при замкнутому роз'єднувачі) або кожену половину лінії жити від своєї підстанції (при розімкнутому роз'єднувачі). Оскільки роботи пристроїв СЦБ безпосередньо залежить виконання графіка руху поїздів дільниці, вони повинні мати резервний джерело живлення. Пристрої СЦБ отримують резервне живлення по лінії через однофазні понижуючі трансформатори від лінії ДПР.

### **1.3 Історія виникнення та застосування системи електричної тяги 27,5 кВ**

Спочатку в Європі електрифікація залізниць здійснювалась на постійному струмі. Причиною цього була відповідна крива тяги / швидкості серійних колекторних двигунів, що використовувались як провідні приводи на залізницях. І сьогодні більше половини всіх електричних тягових систем використовують постійний струм.

На початку ХХ ст. були зроблені спроби використовувати однофазні серійні двигуни на змінному струмі як приводи, які б живилися від однофазного змінного струму на частоті 50 Гц. У Німеччині з'явилася система електропостачання однофазного змінного струму з частотою 16,7 Гц, при цьому електроенергія генерується й розподіляється як одна фаза на окремій залізничній мережі. Цей тип тягового електропостачання застосовується з 1912–1913 рр. Вона була поширена також і в інших країнах, як наприклад Австрія, Швейцарія, Норвегія та Швеція.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 19   |

Ця система тягового електропостачання, показала довела свою спроможність та ефективність при електропостачанні високошвидкісного руху й руху з високою пропускною спроможністю. Цікавий факт, що саме у Німеччині в почався розвиток тягової систем електропостачання зі змінним струмом 50 Гц.

Система електрифікованих залізниць постійно розвивалася і в 2010 році довжина електрифікованих магістральних тягових ліній складала близько 240 200 км по всьому світу. Сюди відноситься такі типи електрифікованих залізниць :

1) постійний струм 1,5 кВ — приблизно 18 760 км — 7,8% від загальної довжини;

2) постійний струм 3 кВ — приблизно 78 000 км — 33% від загальної довжини;

3) змінний струм 16,7 Гц 15 кВ — 35 000 км — 14,6% від загальної довжини;

4) змінний струм 50 Гц 25 кВ — приблизно 98 000 км — 40,5% від загальної довжини.

Таблиця 1.1- Електрифікація залізниць у деяких країнах Європи

| Країна         | Довжина мережі, км | Електрифіковані лінії |           | Рід струму                        |
|----------------|--------------------|-----------------------|-----------|-----------------------------------|
|                |                    | Довжина, км           | Частка, % | Однофазний змінний струм, кВ / Гц |
| Данія          | 2833               | 440                   | 16        | 15 / 16,7                         |
| Німеччина      | 44 214             | 20 463                | 46        |                                   |
| Фінляндія      | 11 726             | 4389                  | 37        | 25 / 50                           |
| Франція        | 31 939             | 14 176                | 44        |                                   |
| Великобританія | 16 596             | 4988                  | 30        |                                   |
| Норвегія       | 4012               | 2530                  | 63        | 15 / 16,7                         |
| Австрія        | 6257               | 3640                  | 58        |                                   |
| Швеція         | 11 599             | 7443                  | 64        | 15 / 16,7                         |

### Прожовження таблиці 1.1

|           |        |      |     |           |
|-----------|--------|------|-----|-----------|
| Швейцарія | 4575   | 4575 | 100 | 15 / 16,7 |
| Іспанія   | 15 171 | 7605 | 50  | 25 / 50   |

Таблиця 1.2- Рівні напруги для контактної мережі

| Система електрифікації | Найменша непостійна напруга, тривалістю до 10хв, В | Найменша постійна напруга, В | Номінальна напруга, В | Максимальна непостійна напруга, тривалістю до 5 хв, В | Максимальна постійна напруга, В |
|------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Змінний струм          | 17 500                                             | 19 000                       | 25 000                | 27 500                                                | 29 000                          |

В Україні застосовуються дві системи живлення

змінного струму АС 25 кВ 50 Гц

постійний струмі DC 3,0 кВ

Для даних залізниць характерні такі рівні напруги:

до 21– 29 кВ, 2,7–4,0 кВ,( у деяких випадках дозволяється напруга не менше 19 кВ на змінному і 2,4 кВ на постійному струмі). Норми рівнів напруги українських електрифікованих ліній відповідають Європейським нормам.

### **1.4 Спотворення якості електричної енергії які викликаються електромагнітними процесами в системі тягового електропостачання змінного струму**

Спотворення показників якості електроенергії (ПКЕ) надають різні згубні впливи на розподільчу мережу та споживача. При цьому вихід показників за межі норм, що визначаються ГОСТ-32144-2013 супроводжується зміною параметрів трифазної системи напруги.

Ідеальна система трифазної напруги характеризується частотою 50 Гц, зсувом фаз, рівним  $120^\circ$ , і рівністю величин напруг у кожній фазі. Для підтримки цих параметрів у межах норми існують організаційні та технічні засоби. До пе-

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 21   |

реварг організаційних заходів можна віднести відносну дешевизну та універсальність, але такого підходу найчастіше виявляється недостатньо, тому широкого поширення набули технічні засоби, здатні забезпечити високу якість електроенергії.

#### Провали та переривання напруги

На рисунку 1.6 зображена осцилограма процесу, викликаного провалом напруги, що полягає в зниженні напруги хоча б однієї фази нижче порогового значення. Такі події відносять до випадкових, воно виникає через несправності в електричній мережі або в електроустановках споживача, при включенні потужного навантаження або при виникненні аварійних ситуацій. На рисунку 1.7 зображено переривання напруги, яке характеризується значеннями напруги в кожній із фаз нижче 5% від опорної напруги.

Розглядаючи побутові навантаження, то до основних технічних засобів, здатних компенсувати провал та переривання напруги, можна віднести імпульсні блоки живлення (ДБЖ).

На промислових підприємствах з великою потужністю навантажень допомогти уникнути згубних впливів провалів та переривань напруги здатні системи накопичення електроенергії, які під час виникнення провалу перетворюють накопичену електричну енергію на напругу необхідного рівня. Більш детально такі системи описані у розділі системи накопичення електроенергії (ESS).

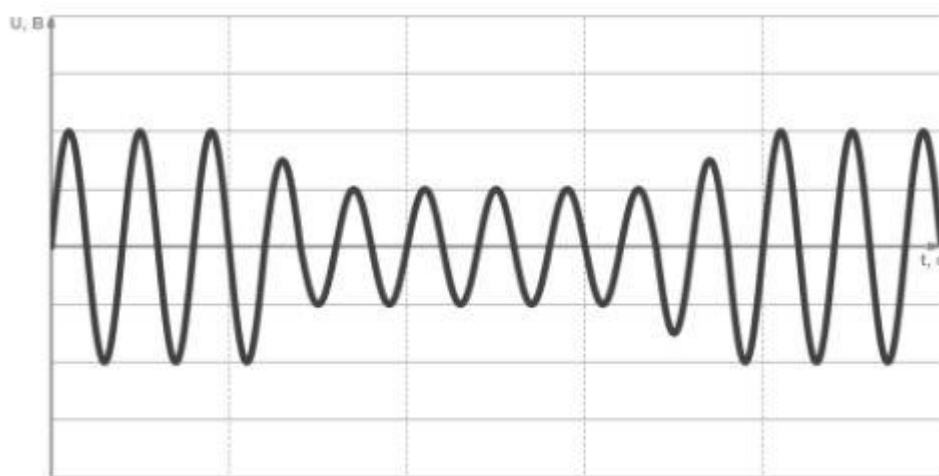


Рисунок 1.6 - Провал напруги

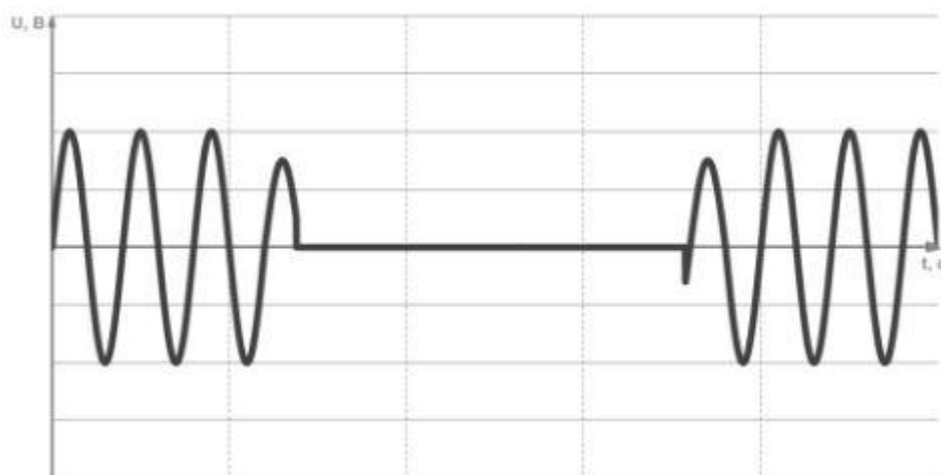


Рисунок 1.7. - Переривання напруги

#### Імпульсні перенапруги

Імпульсні перенапруги в точці передачі електричної енергії споживачеві викликаються, в основному, блискачковими розрядами або комутаційними процесами в електричній мережі або електроустановках споживача електричної енергії. Час наростання імпульсної напруги може змінюватися в широких межах (від значень менше 1 мікросекунди до декількох мілісекунд).

На середній та високій напрузі для захисту від згубних впливів перенапруг використовуються обмежувачі перенапруги (ГНН), принцип їх дії заснований на напівпровідникових елементах, що мають нелінійну вольт-амперну характеристику.

Для захисту від перенапруг в низьковольтній мережі використовуються реле напруги, стабілізатори напруги або джерела безперебійного живлення, в яких передбачена відповідна функція. Також є модульні пристрої захисту від імпульсних перенапруг, призначені для установки в домашній розподільний щиток.

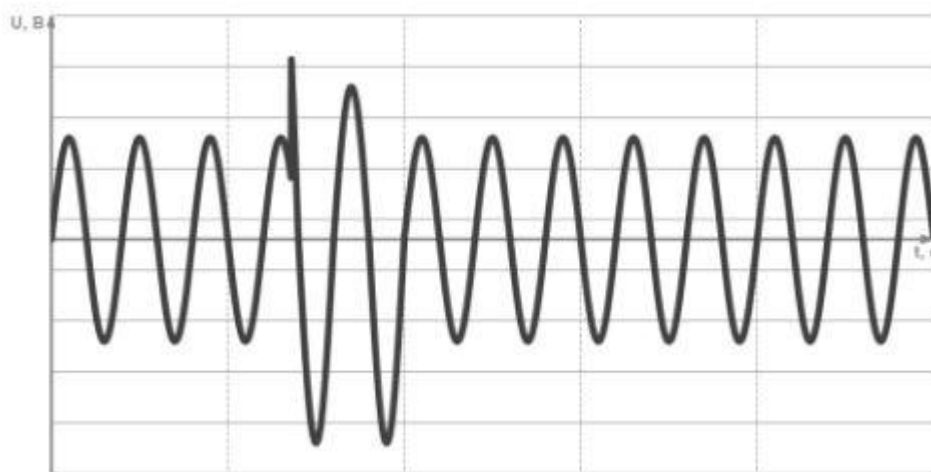


Рисунок 1.8 - Імпульсні перенапруга

#### Несинусоїдальність та флуктуація напруги

Наявність потужного нелінійного навантаження веде до виникнення несинусоїдності напруги живлення. На рисунку 1.9 наведено типову форму кривої напруги, яка виникає при живленні потужного випрямляючого навантаження. Спостворена форма кривої напруги може призводити до виходу з ладу обладнання, що має загальну точку живлення з нелінійним навантаженням. Так само несинусоїдність напруги та струму призводить до виникнення додаткових теплових втрат у провідних елементах мережі, що викликає швидке старіння ізоляції кабелів та трансформаторів. Тому для виключення згубних впливів струмів гармонік на мережу необхідно проведення організаційних заходів або застосування сучасних технічних засобів, здатних вирішити цю проблему.

До організаційних заходів можна віднести правильний розподіл нелінійного навантаження по точках живлення або за великої кількості такого навантаження окреме харчування чутливого обладнання. Так само ефективним засобом є використання якісного обладнання з високим ступенем електромагнітної сумісності, наприклад, ДБЖ з корекцією коефіцієнта потужності.

Говорячи про технічні засоби, здатні вирішити проблему гармонічних спотворень, існує велика їх кількість, але до основних можна віднести: фільтрокомпенсуючі пристрої (ФКУ) і активні фільтри гармонік (АФГ).

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 24   |

ФКУ засновані на пасивних елементах, таких як конденсатори та реактори та на їх електрофізичній взаємодії. Активні фільтри гармонік є більш сучасними пристроями, їх принцип дії заснований на перетворення напруги за допомогою силових інверторів на струм необхідної форми.

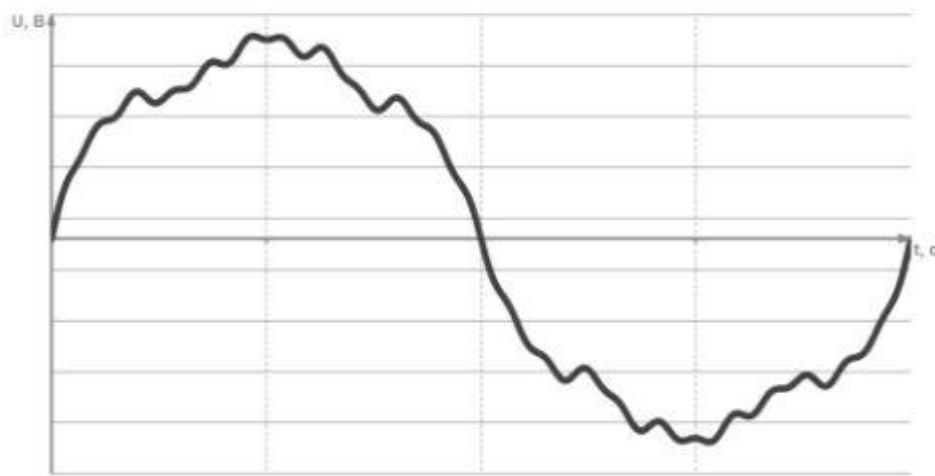


Рисунок 1.9 - Несинусоїдність напруги

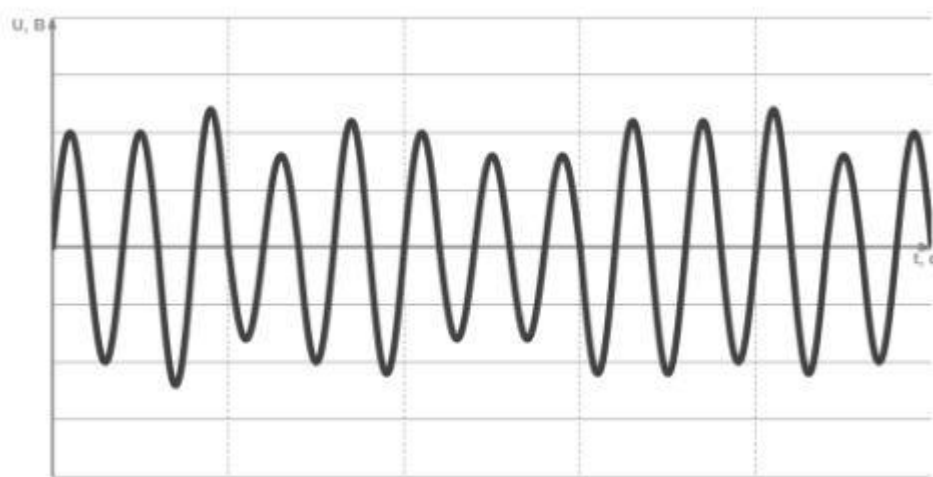


Рисунок 1.10 - Флуктуація напруги

Несиметрія напруг

Ще одним показником якості електроенергії є несиметрія напруги. Цей показник характеризується різницею значень напруг у кожній фазі та відхиленням фазного зсуву від значень  $120^\circ$ .

До негативних наслідків несиметрії напруги можна віднести збої в роботі трифазного обладнання, а також виникнення додаткових втрат у силових трансформаторах і двигунах.

Для боротьби з несиметрією рекомендується проводити організаційні заходи щодо рівного розподілу однофазних навантажень по фазах. До технічних засобів можна віднести симетруючі трансформатори, їх особливість полягає в наявності додаткової обмотки, що симетрує, в обмотках фаз трансформатора. Ця обмотка вбудовується в нульовий провід і при виникненні струму в ньому компенсує потоки нульової послідовності, що протікають магнітопроводом.

Здатність компенсувати несиметрію напруги і струму мають розглянуті вище системи накопичення електроенергії (ESS) і активні фільтри гармонік. Завдяки сучасній системі інверторів ESS здатні забезпечити симетричне споживання потужності з мережі навіть за абсолютно несиметричного навантаження.

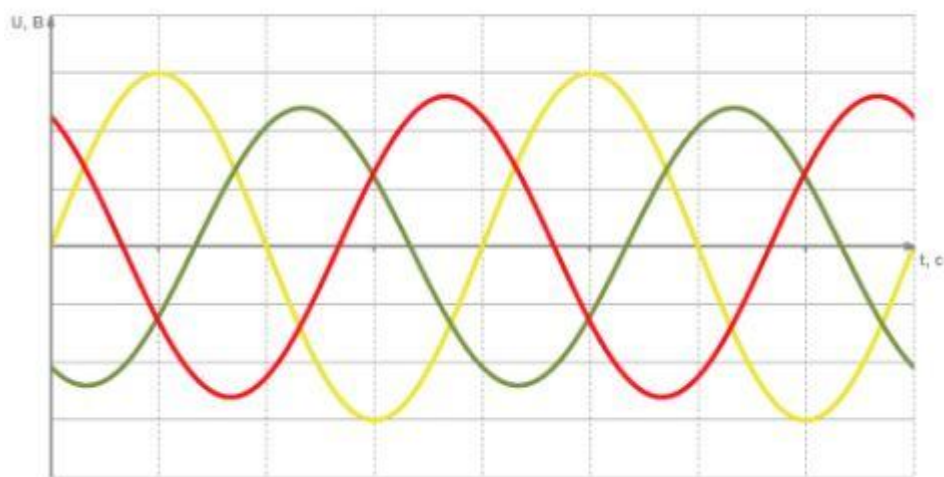


Рисунок 1.11 - Несиметрія напруги

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

## **2.МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СПОТВОРЕНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СИСТЕМ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ**

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

В системі тягового електропостачання істотну роль на режим тягової мережі надають гармонійні складові тягового навантаження. При цьому спотворюється форма кривої напруги на струмоприймачі електрорухомого складу, що погіршує його роботу, підвищуються втрати потужності і напруги в тяговій мережі. Крім того, можливі резонансні явища в системі тягового і зовнішнього електропостачання. Наявність гармонійних складових і їх кількісний склад розглядалися в багатьох роботах. Гармонійні складові ускладнюють проведення розрахунків системи тягового електропостачання потужності, її елементів і, зокрема, параметрів і режиму роботи фільтрокомпенсуючі установок. У Правилах запропоновані усереднені дані гармонік струму в тяговій мережі в режимах тяги і рекуперації, однак запропонований широкий діапазон значень гармонійних складових ускладнює використовувати ці дані в конкретних розрахунках. Крім того, в [4] немає даних по фазовим характеристикам гармонійних складових струму, що не дозволяє розраховувати втрати напруги від гармонійних складових.

Для підвищення ефективності розрахунків системи тягового електропостачання необхідно формувати цифрову модель, де складовою частиною повинна бути модель електрорухомого складу (ЕРС), що формує спектр гармонійних складових струму. В цьому випадку в розрахунку будуть брати участь одночасно всі гармоніки, що генеруються ЕРС, і буде враховано взаємний вплив кожної з них. Побудова моделей ЕРС відомо з багатьох джерел, наприклад [9-10], де строго за відомими формулами для однофазного випрямляча ЕРС формувалася струм первинної обмотки трансформатора, при цьому в [10] дано аналітичний вираз апроксимованої вольт-амперної характеристики тиристора. В результаті форма кривої струму ЕРС в сталому режимі виходить подібно кривої на рис. 1.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 27   |

При наявності регульованого перетворювача на тиристорах крива струму и зсувається на кут регулювання  $\alpha$ -і'. Таку криву струму ЕРС використовують у всіх зазначених цифрових моделях.

В [10] запропоновано для розрахунків приймати процентне зміст гармонійних складових струму електровоза, наприклад для 3, 5 і 7-й гармонік струму двокільного ділянки - в режимі тяги 17%: 8,2% і 3,0% і в режимі рекуперації - 24%; 7,2% і 5,3%. Однак, як показують експериментальні дослідження, далеко не у всіх випадках криві струму подібні кривої, а гармонійні складові не завжди відповідають [10], і, як результат, можливі похибки в розрахунках.

Форма кривої тягового струму і його гармонійний склад залежать від багатьох факторів і, зокрема:

1) від типів ЕРС і режимів їх роботи; форма струму фідера - від числа струмів електровозів, що працюють з різними кутами комутації. Більше 90% ЕРС (наприклад ВЛ-80с), експлуатованих на вітчизняних залізницях, оснащені колекторними двигунами і двухполуперіодним випрямлячами. На електровозах з рекуперацією (наприклад ВЛ-80) застосовують тиристорне управління. Незважаючи на поступове збільшення обсягів застосування ЕРС з асинхронними двигунами, обсяг їх впровадження поки ще залишається малим, тому в найближчі роки переважна кількість ЕРС, що застосовується на залізницях, буде оснащено випрямними установками і колекторними двигунами. При формуванні математичної моделі тягового навантаження в загальному випадку слід орієнтуватися на різні типи ЕРС;

2) наявності підключених до тягової підстанції магістральних ділянок або (і) великих залізничних станцій, на яких відрізняється режим роботи ЕРС;

3) резонансних явищ в системах зовнішнього електропостачання (СВЕ), в основному через резонанс на 5-й і 7-й гармоніках;

4) складу гармонійних складових зрівняльного струму.

Отже, вказані причини відмінності реальних кривих струму тягового навантаження від теоретичних, тому використання в дослідженнях і розрахунках тяго-

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 28   |

вого навантаження з урахуванням моделі електровоза з гармонійними складовими струму, отриманими тільки на підставі розрахунків електромагнітних процесів в електровозах з випрямними установками [11-13], на думку авторів, може привести до помилок.

У статті узагальнюються експериментальні дослідження форми і складу гармонік тягового струму для формування наближеною до реальної функції тягового струму підстанції як складового елементу цифрової моделі системи тягового електропостачання.

Принципова позиція авторів з розробки моделі тягового навантаження полягає в наступному.

1. Формування моделі струму ЕРС на діючій ділянці повинно базуватися на «вимірної» формі кривої струму розглянутого ділянки електрифікованої залізниці. Тому принципово не важливо, які типи електровозів функціонують на цій ділянці і які режими їх роботи.

2. Формування моделі струму ЕРС на проектованій ділянці повинно базуватися на використанні кривих струму, отриманих експериментальним шляхом на аналогічних діючих ділянках, подібних проектованого. В крайньому випадку, слід орієнтуватися на форми кривої тягового струму для магістральних ділянок і великих залізничних станцій, наведені в цій статті.

Пропонується наступна послідовність розрахунків системи тягового електропостачання з цифровою моделлю ЕРС:

1) побудова моделі тягового навантаження по вимірним значенням гармонійних складових;

2) формування цифрової моделі системи тягового електропостачання з урахуванням тягового навантаження;

3) для СВЕ - цифрове моделювання перехідних і сталих процесів в заданих режимах;

4) розрахунок показників якості електроенергії за результатами моделювання, тобто визначення значень коефіцієнтів гармонійних складових і-го порядку і сумарного і порівняння їх з допустимими значеннями.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 29   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |

## 2.2 Дослідження несиметрії в системах електричної тяги методом фазних координат

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 заздалегідь визначену форму.

Проведені в дипломній роботі дослідження показали, що 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.

Аналіз повного циклу підключень тягових підстанцій до системи зовнішнього електропостачання та закономірності перетворення системи векторів на-пруги трансформаторів, дозволив визначити схеми приєднання вхідних вводів ФПП до шин підстанції, щоб отримати на його виході однакові системи векторів напруги.

На рисунку 2.1 показано шість способів приєднання підстанцій до зовнішньої мережі та шість відповідних схем підключення ФПП до тягових шин, що забезпечує однакову конфігурацію векторів напруги для двостороннього живлення споживача від трифазної лінії.

Векторні діаграми, приведені на рисунку 2.2, показують яким чином змінюються системи векторів лінійних напруг при чергуванні фаз тягового трансформатора та застосуванні ФПП.

При чергуванні приєднань вводів 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. У результаті цього конфігурації системи векторів напруги суміжних тягових підстанцій мають дзеркальну симетрію. Метод забезпечення двостороннього живлення з використанням ФПП представлено у вигляді таблиці 2.1. У методі враховано схеми з'єднання обмоток

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 30   |

тягових трансформаторів, що утворюють першу або одинадцятую групу, та схему підключення підстанцій до системи зовнішнього електропостачання.

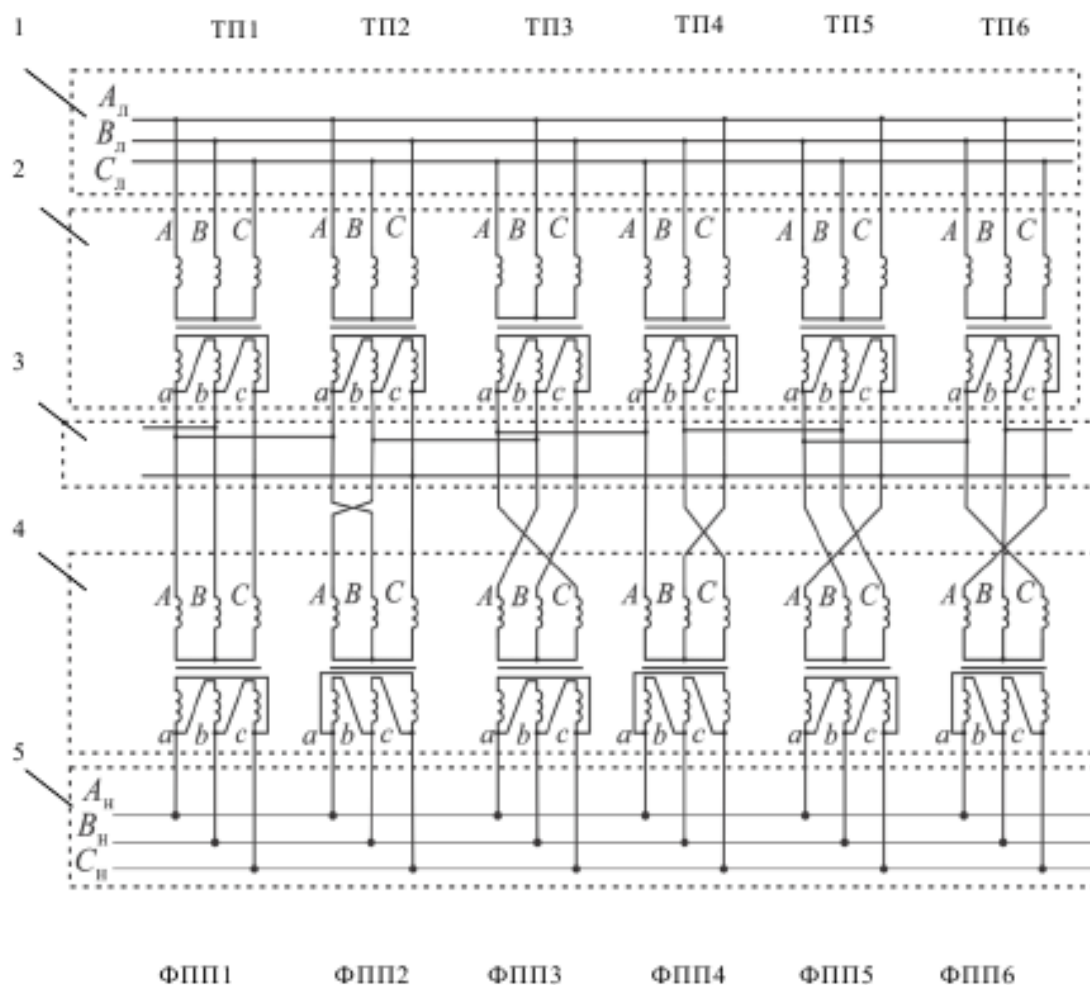


Рисунок 2.1 - Підключення фазоповоротного пристрою до шести тягових підстанцій: 1 - схеми підключення тягових підстанцій (ТП) до мережі загального призначення; 2 - схеми тягових трансформаторів підстанцій; 3 - схеми підключення тягової мережі та фазоповоротних пристроїв до тягової обмотки трансформаторів; 4 - фазоповоротні пристрої; 5 - схеми приєднання трипровідної лінії нетягового електропостачання 27,5 кВ до фазоповоротних пристроїв

Користуючись таблицею 2.1 можна вибрати групу ФПП та схему його приєднання до шин підстанції. Наприклад, коли обмотки тягового трансформатора з'єднані у «зірку» та «трикутник», що утворює одинадцятую векторну групу, а вводи обмотки високої напруги підключені до зовнішньої мережі, як показано на схемі № 2 (таблиця 2.1, колонка 2), 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 c – до виводів схеми підстанції ТП2 та ФПП2.

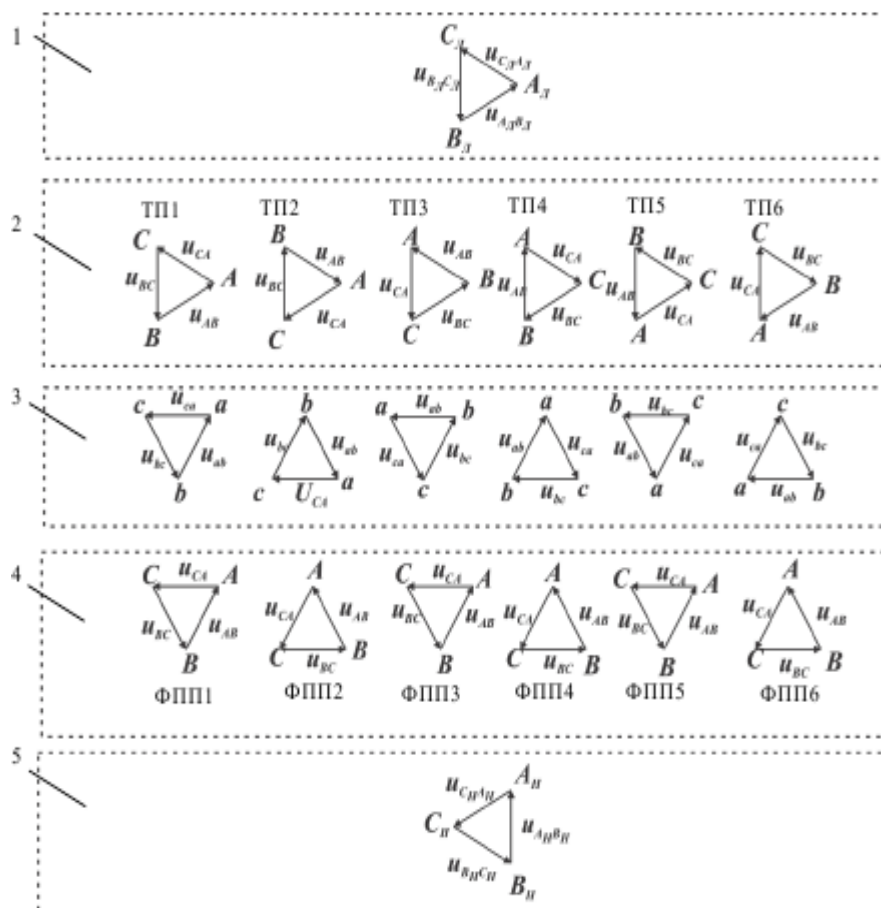
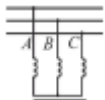
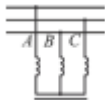
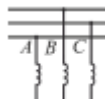
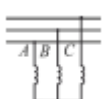
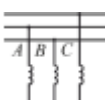
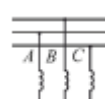


Рисунок 2.2 - Векторні діаграми напруг системи електропостачання із ФПП: 1 – вектори лінійної напруги лінії електропостачання; 2, 3 - вектори напруги на первинних та на вторинних обмотках тягових трансформаторів; 4 - вектори первинної обмотки ФПП; 5 - векторна діаграма напруги у лінії нетягового електропостачання

Для підстанції з тяговим трансформатором першої групи з'єднання обмоток, що підключається до зовнішньої мережі, як показано на схемі №3 (табл. 2.1, колонка 2) використовується ФПП із групою У/Д-11. Вивід а вторинної обмотки трансформатора приєднується до виводу С первинної обмотки ФПП, вивід b приєднується до виводу А ФПП, а вивід c – до виводу В відповідно.

Можна зауважити, що незалежно від векторної групи, для кожної непарної схеми підключення первинної обмотки трансформатора до системи зовнішнього електропостачання є лише один варіант приєднання ФПП (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 Вибір схеми та групи фазоповоротного пристрою

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

На рисунку 2.3 показано розрахункову схему системи електропостачання залі-зниці з приєднанням до тягових шин підстанцій фазоповоротними пристро-ями та трипровідною мережею нетягового електропостачання.

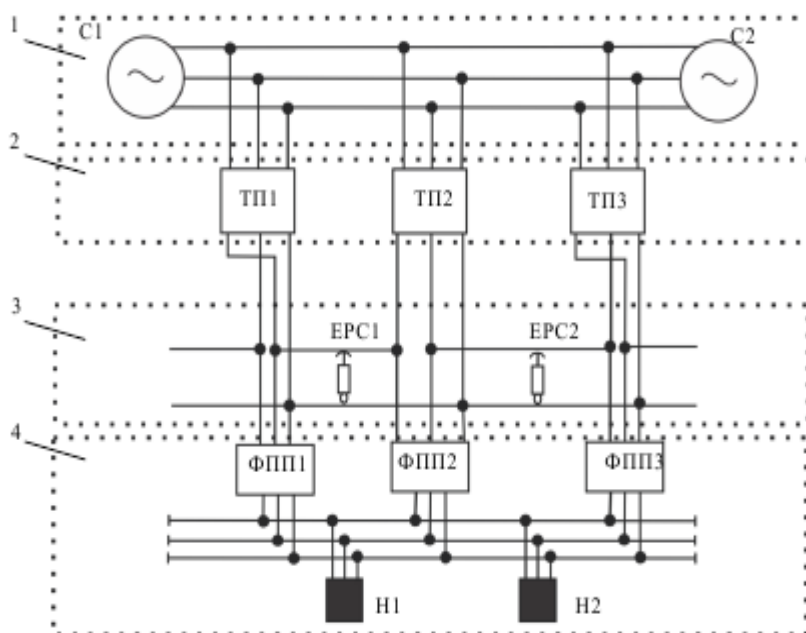


Рисунок 2.3 - Система електропостачання ділянки залізниці Помічна - Осикувата - Сугоклея із живленням нетягового споживача через фазоповоротний пристрій та трипровідну лінію: C1, C2 - електроенергетичні системи; 1 - система зовнішнього електропостачання; 2 - тягові підстанції (ТП1, ТП2, ТП3); 3 - тягова мережа та еквівалентне тягове навантаження (ЕРС1, ЕРС2); 4 - трипровідна лінія, фазоповоротні пристрої (ФПП1, ФПП2, ФПП3) та еквівалентне нетягове навантаження (Н1, Н2, Н3).

Значення електричних параметрів ФПП прийняті на підставі технічних умов до силових трансформаторів [7, 8]. За якими визначено потужності та струму холостого ходу, потужності та напруги короткого замикання для трансформаторів із напругою високої обмотки 35 кВ та потужністю 2500 кВА.

Значення потужності ФПП вибрано із урахуванням потужності еквівалентного споживача та коефіцієнтом запасу 1,5, що враховує струмове навантаження ФПП у вимушених режимах. Вибрані значення потужності та струму холостого ходу, потужності та напруги короткого замикання для масляного трансформатора становлять відповідно 5 кВт та 1,2 %, 25 кВт та 10 %.

Таблиця 2.2 Параметри фазоповоротного пристрою

| Параметр                                                          | Значення |
|-------------------------------------------------------------------|----------|
| Активний опір первинної обмотки, Ом                               | 1,5      |
| Активний опір вторинної обмотки, Ом                               | 0,5      |
| Індуктивність розсіювання первинної обмотки, Гн                   | 0,048    |
| Індуктивність розсіювання вторинної обмотки, Гн                   | 0,016    |
| Кількість витків первинної обмотки                                | 1071     |
| Кількість витків вторинної обмотки                                | 618      |
| Магнітна індуктивність крайніх стержнів магнітної системи, с/Гн   | 1,5      |
| Магнітна індуктивність середнього стержня магнітної системи, с/Гн | 0,5      |

Отримані при моделюванні системи електропостачання ( рисунок 2.3) значення струмів електроенергетичної системи та нетягового споживача приведені на осцилограмах рисунках 2.4, 2.5.

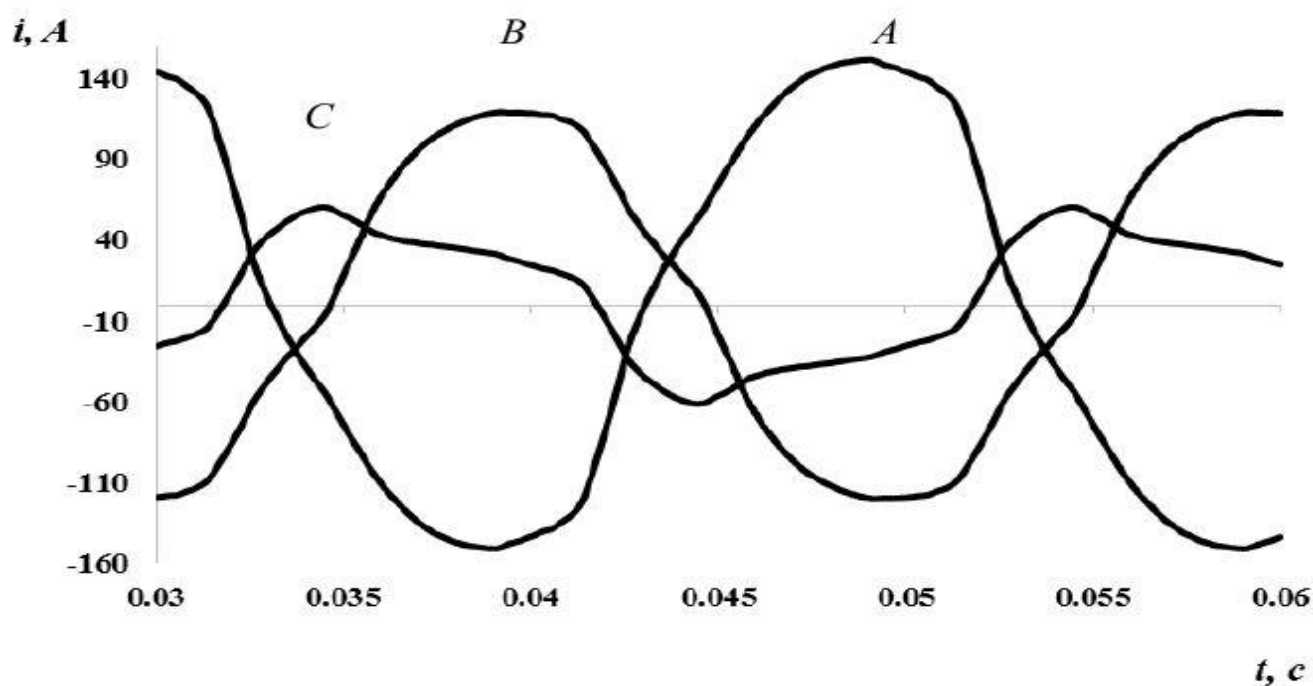


Рисунок 2.4 - Осцилограми сумарних первинних струмів підстанцій при-  
ведених до електроенергетичної системи С1 при живленні нетягового споживача  
через фазоповоротний пристрій та трипровідну лінію

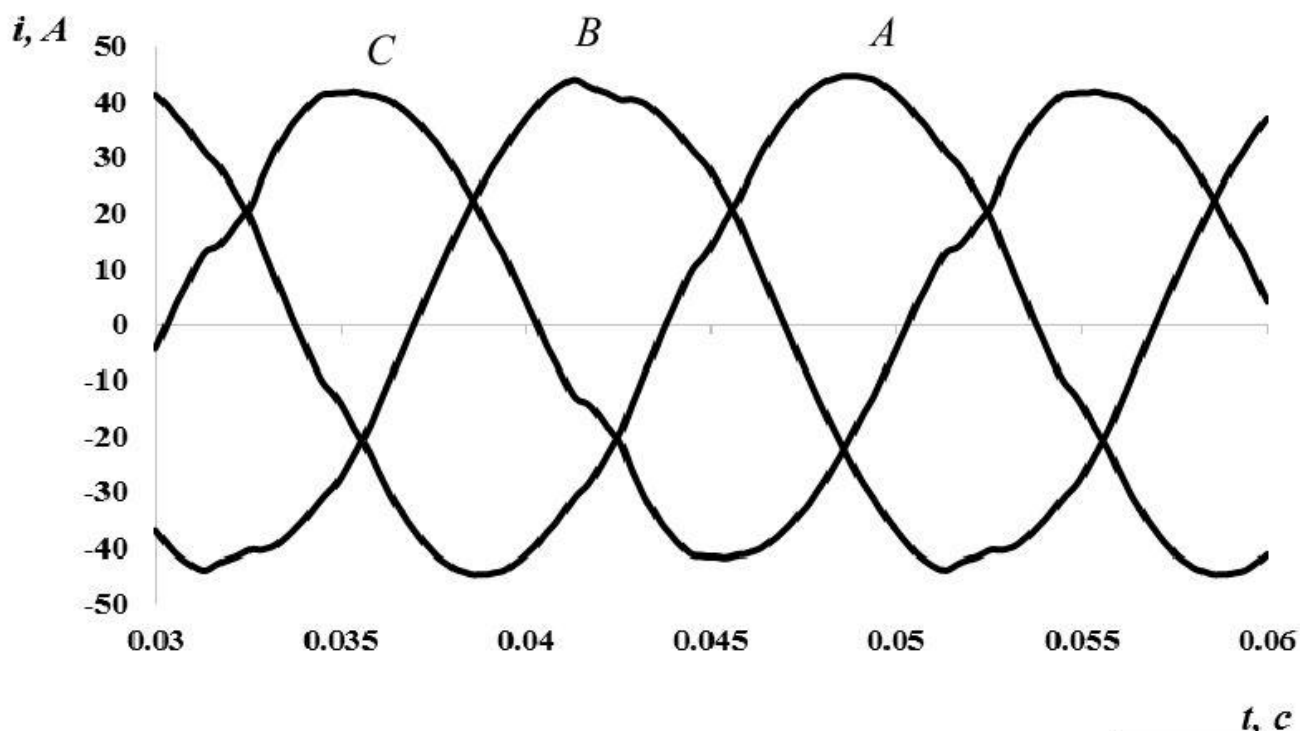
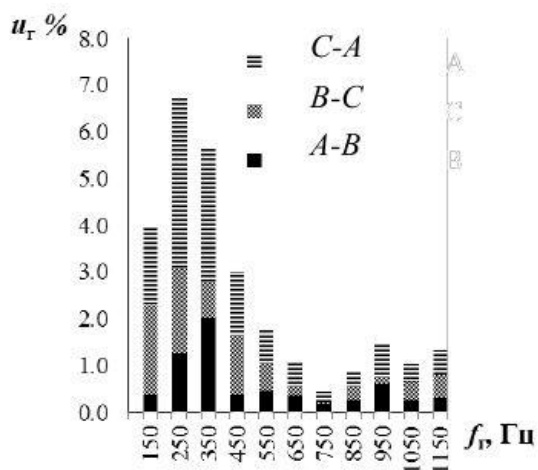
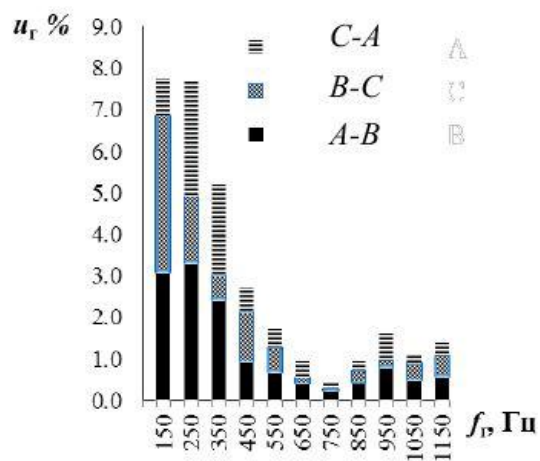


Рисунок 2.5 - Осцилограми струмів нетягового споживача, що отримує живлення від трипровідної лінії та фазоповоротного пристрою

Частки вищих гармонік у напрузі, що живить підстанції та споживачів, представлені на рисунках 2.6, 2.7.



Н1



Н2

Рисунок 2.6 - Частотний спектр лінійної напруги живлення споживача від трипровідної лінії та фазоповоротного пристрою

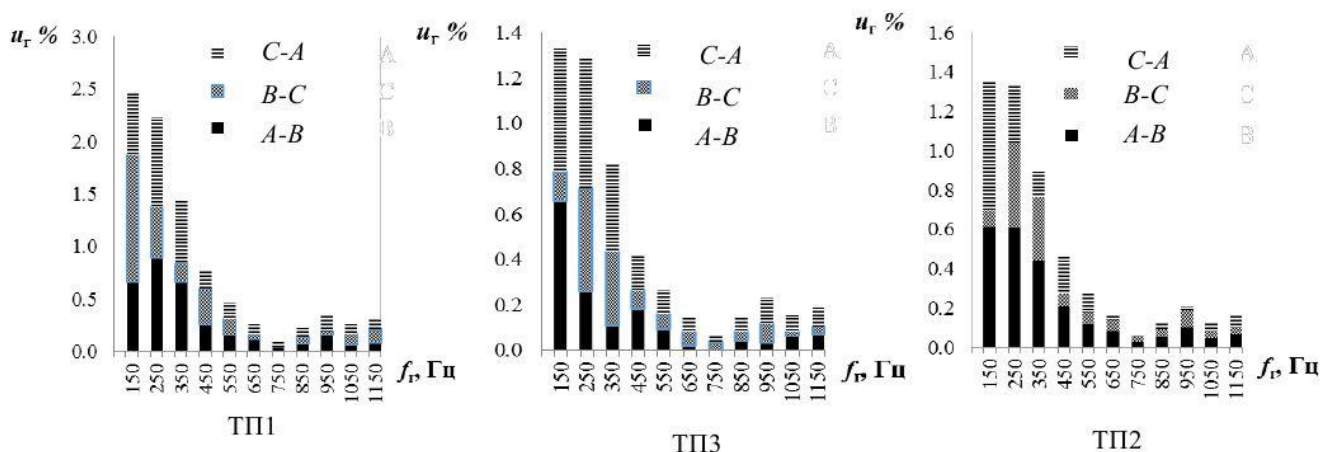


Рисунок 2.7 - Частотний спектр лінійної напруги живлення підстанцій при моделюванні системи із двостороннім живленням від трипровідної лінії та фазоповоротного пристрою

1. Для підвищення ефективності передачі електричної енергії нетяговим споживачам, що отримують живлення від шин тягової підстанції з напругою 27,5 кВ, доцільно реконструювати лінію «два проводи-рейка» у трипровідну трифазну лінію, яка отримуватиме живлення через фазоповоротний пристрій від тягових шин суміжних підстанцій.

2. Фазоповоротний пристрій для двостороннього живлення споживачів від шин тягових підстанцій залізниці змінного струму із різними конфігураціями векторів напруги представляє собою трифазний трансформатор, конструкція якого дозволяє під час експлуатації встановлювати схему з'єднання обмоток «зірка-трикутник» одинадцятої та першої групи. Група з'єднання та схема підключення первинної обмотки фазоповоротного пристрою залежить від способу приєднання тягової підстанції до системи зовнішнього електропостачання.

3. Відмова від чергування фаз у схемах підключення тягових підстанцій до зовнішньої системи електропостачання призведе до зменшення втрат потужності при передачі електричної енергії лінією «два проводи-рейка» до двох разів, але призведе до зростання несиметрії напруги у системі зовнішнього електропостачання у п'ять разів та несинусоїдності у 1,3...3 рази.

4. Запропонований спосіб живлення нетягових споживачів дозволяє підвищити якість електропостачання, зменшуючи несиметрію та несинусоїдність

напруги у місці приєднання до лінії «два проводи-рейка» споживача у 1,3...1,4 рази та 1,11...2 рази відповідно. За рахунок забезпечення двостороннього живлення із використанням ФПП сукупні втрати електроенергії у трипровідній лінії напругою 27,5 кВ та у фазоповоротних пристроях становлять 1,6...2,1 % проти 2,7...3 % у лініях ДПР до модернізації відносно нетягового електроживлення на шинах підстанції 27,5 кВ.

### 2.3 Методика імітаційного моделювання в програмному комплексі «iSET»

Програмний комплекс «Інтелектуальна система електропостачання транспорту «iSET» розроблений Українським державним університетом науки і технологій.

Призначення програмного комплексу – розрахунок режимних показників системи тягового електропостачання для залізниць постійного та змінного струму, а саме значень фідерних і первинних струмів, розподілу струмів в контактній мережі, втрат напруги, потужності, витрат електричної енергії та основних показників якості електроенергії в системі тягового електропостачання з врахуванням технічних засобів поліпшення якості електричної енергії; виконання оптимізаційних розрахунків оптимальних параметрів системи тягового електропостачання та визначення законів управління технічними засобами з метою підвищення ефективності режиму роботи системи тягового електропостачання.

Для опису структури програми було обрано діаграму компонентів. Діаграма компонентів (рисунок 2.8) описує особливості фізичного представлення системи. Діаграма компонентів дозволяє визначити архітектуру системи, що розробляється.

На рисунок 2.9 приведено структуру головного інтерфейсу програми, з виокремленням основних класів компонент.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 38   |

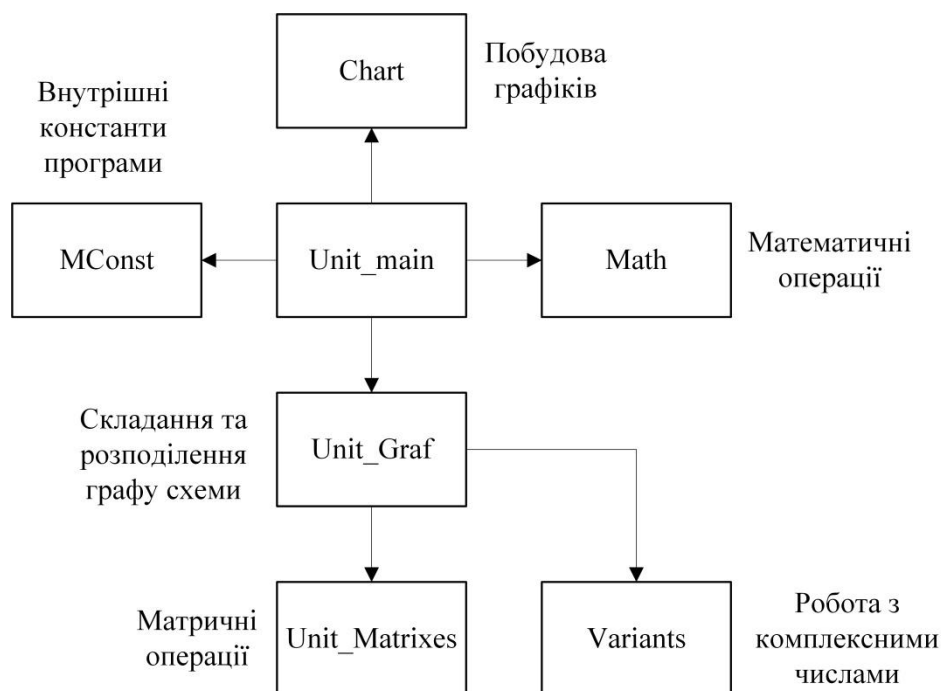


Рисунок 2.8 - Діаграма компонентів

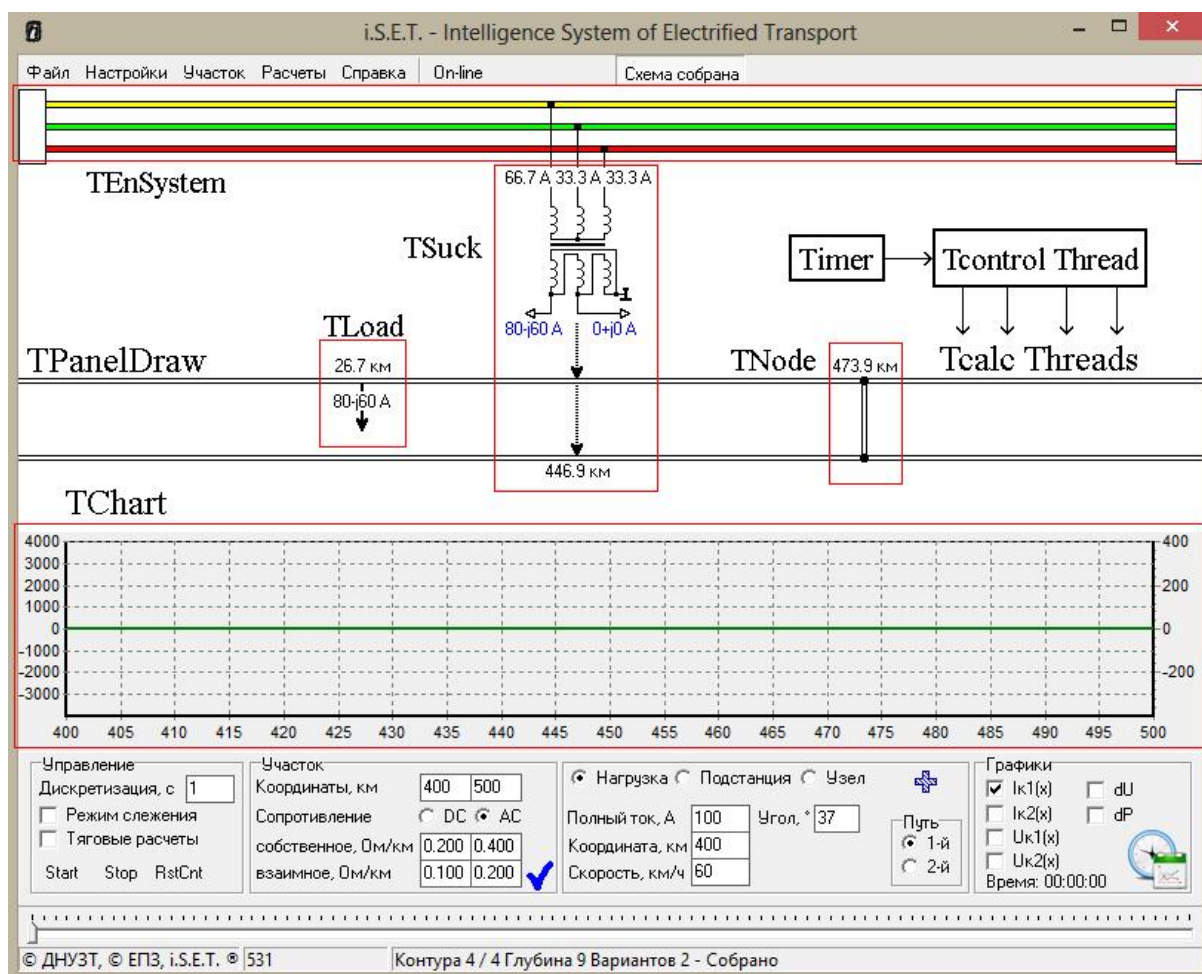


Рисунок 2.9 - Структура інтерфейсу програми з основними класами

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

Для запуску інтелектуальної системи електропостачання транспорту «iSET» необхідно спочатку перенести папку iSET, що знаходиться у дистрибутиві програми, на локальний диск комп'ютера користувача.

Папка iSET містить у собі наступні папки:

- iSET\MAIN – містить файли програми, у тому числі файл «iSET.exe» для запуску програми;
- iSET\Doc – містить документацію програмного комплексу.

Для запуску інтелектуальної системи електропостачання транспорту необхідно запустити файл «iSET.exe», що знаходиться у директиві iSET\MAIN. Після запуску на екран буде виведено головне вікно програми.

Вхідними даними програми є:

- $x_g(n, t)$  – графік руху поїздів, який являє собою двовимірний масив з параметрами  $n$  – номер поїзду та  $t$  – час руху;
- $I_p(n, t)$  – масив тягових струмів у вигляді функції, що визначає струм поїзда з номером  $n$  в часі  $t$  з виконанням лінійної інтерполяції;
- $L$  – довжина ділянки електрифікованої залізниці, км;
- $L_0$  – координата початку ділянки, км;
- $L_k$  – координата кінця ділянки, км;
- $r_0, x_0, r_m, x_m$  – питомі активні та індуктивні опори тягової мережі, Ом/км;
- $\Delta t$  – крок розрахунку (дискретизація), с;

Вихідними даними програми є:

- $I_{f1}(t), I_{f2}(t), I_{f3}(t), I_{f4}(t)$  – струми чотирьох фідерів кожної тягової підстанції в момент часу  $t$  від всіх поїздів;
- $I_{k1}(n, t, x), I_{k2}(n, t, x)$  – струми в контактній мережі першої та другої колії від поїзда з номером  $n$  в момент часу  $t$  в координаті  $x$ ;
- $\Delta U_{k1}(n, t, x), \Delta U_{k2}(n, t, x)$  – падіння напруги в контактній мережі першої та другої колії від поїзда з номером  $n$  в момент часу  $t$  в координаті  $x$  без урахування впливу інших поїздів;

- $I_{k1}(t,x), I_{k2}(t,x)$  – струм в контактній мережі першої та другої колії від усіх поїздів;
- $\Delta U_{k1}(t,x), \Delta U_{k2}(t,x)$  – падіння напруги в контактній мережі першої та другої колії від всіх поїздів та підсилюючого пункту;
- $\Delta U'_{k1}(t,x), \Delta U'_{k2}(t,x)$  – падіння напруги в контактній мережі першої та другої колії від всіх поїздів без урахування підсилюючого пункту;
- $\Delta P_{k1}(t,x), \Delta P_{k2}(t,x)$  – втрати потужності в контактній мережі першої та другої колії в момент часу  $t$  в координаті  $x$  від всіх поїздів та підсилюючого пункту;
- $\Delta P_k(t,x)$  – сумарні втрати потужності в контактній мережі обох колій в момент часу  $t$  в координаті  $x$  від всіх поїздів та підсилюючого пункту;
- $\Delta P_k(t)$  – сумарні миттєві втрати потужності в контактній мережі обох колій в момент часу  $t$  від всіх поїздів та підсилюючого пункту;
- $U_e(n,t)$  – напруга на струмоприймачі електровозу з номером  $n$  в момент часу  $t$  з урахування впливу інших поїздів;
- $U_{k1}(t,x)$  – напруга в контактній мережі першої колії в момент часу  $t$  в координаті  $x$ ;

$U_{k2}(t,x)$  – напруга в контактній мережі другої колії в момент часу  $t$  в координаті  $x$ ;

Після запуску виконавчого файлу програми на екран виведеться головне вікно програми «Інтелектуальна система електропостачання транспорту «iSET» (рисунки 2.10). Вікно дозволяє ввести вихідні дані, обрати режим оптимізації, переглянути результати оптимізації. Головне вікно програми візуально поділене на функціональні області – панелі.

Панель «Участок» (рисунки 2.11) призначена для введення параметрів розрахункової ділянки (довжину ділянки, рід струму, питомий опір тягової мережі). Якщо ділянка електрифікована змінним струмом, необхідно вказати взаємний опір. Після введення чи зміни даних необхідно натиснути кнопку «Применить».

За допомогою панелі (рисунки 2.12) на розрахунковій схемі розташовуються тя-

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 41   |

гові підстанції, пункти секціонування та паралельного з'єднання підвісок контактної мережі, навантаження.

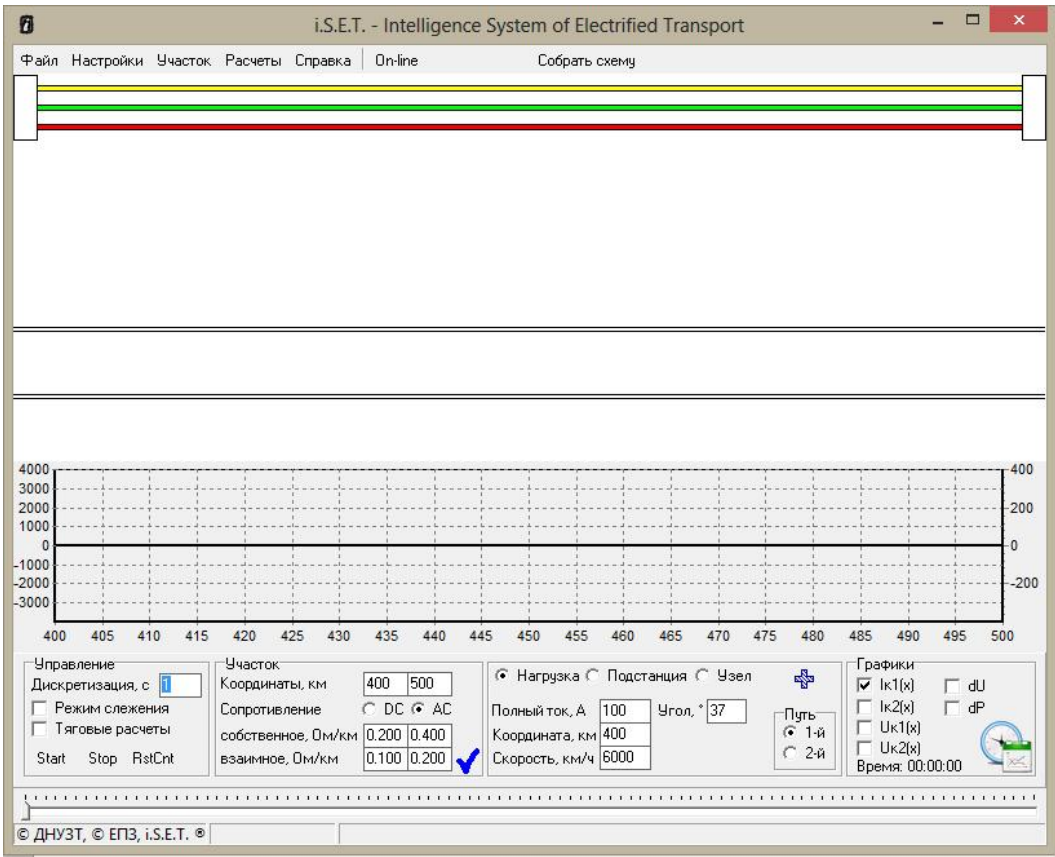


Рисунок 2.10 - Головне вікно програми «iSET»

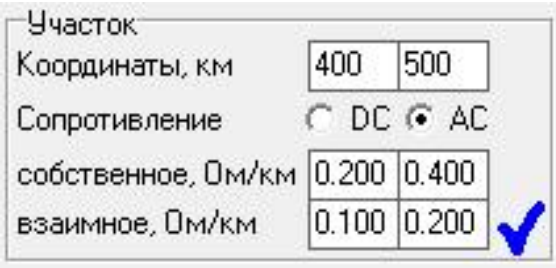


Рисунок 2.11 - Панель «Участок» головного вікна програми

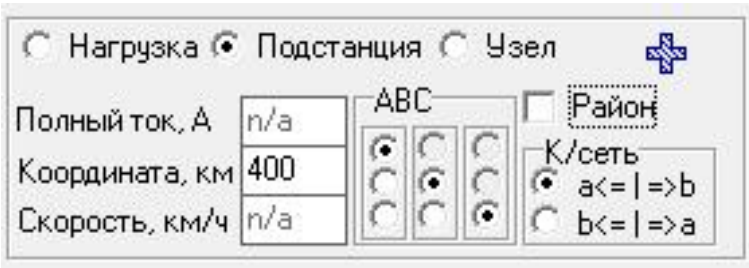


Рисунок 2.12 - Панель редагування схеми і навантажень головного вікна програми

Для розташування тягової підстанції необхідно:

- задати початкову координату розташування;
- вибрати схему підключення до первинної мережі;
- вибрати схему підключення до тягової мережі;
- вказати наявність районних споживачів.

Після появи тягової підстанції в робочій області програми її можна пересувати вздовж розрахункової ділянки (рисунк. 2.13) за допомогою «миші» на головній формі програми.

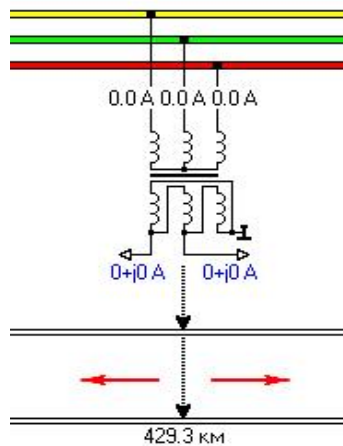


Рисунок 2.13 - Розташування тягової підстанції в робочій області програми

При завершенні розміщення тягових підстанцій та вузлів схеми необхідно натиснути кнопку «Собрать схему» (рисунк 2.14). Після цього система складає граф схеми, з'явиться інформація про необхідну кількість незалежних контурів у схемі, глибину розрахунку та загальну кількість контурів. Потім відбувається пошук незалежних контурів, про що свідчить повідомлення у статусі «поиск», який переходить у фільтрацію до тих пір, поки не буде знайдено необхідну кількість незалежних контурів. Про можливість подальших операцій інформує статус «готово». Потім виконується розрахунок напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій, струмів плечей живлення, при цьому в зовнішній системі живлення відображаються фазні струми.

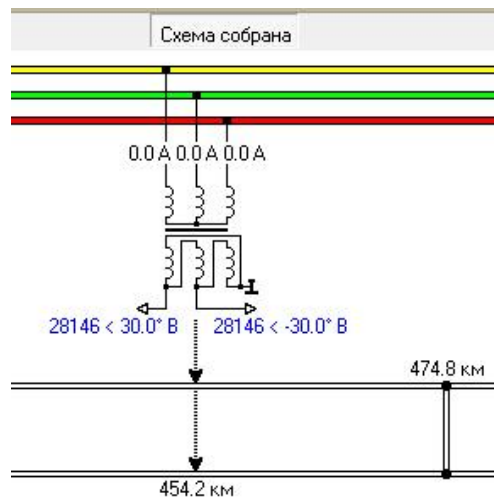


Рисунок 2.14 - Збирання розрахункової схеми

Після збирання схеми можна додавати навантаження. Для цього необхідно:

- задати початкову координату розташування;
- задати повний струм та кут навантаження;
- задати швидкість руху поїзда;
- вибрати колію для розташування.

Після задання необхідних параметрів і натискання кнопки «Добавить» збирається остаточна схема розрахунку (рисунок 2.15).

Для імітації руху поїздів та розрахунку створеної ділянки у загальному режимі необхідно натиснути кнопку «Start», для зупинки розрахунку – кнопку «Stop», які знаходяться на панелі «Управление» (рисунок 2.16). На цій же панелі задається дискретизація розрахунку. Для відображення зміни параметрів системи тягового електропостачання в реальному часі необхідно натиснути кнопку «On-line».

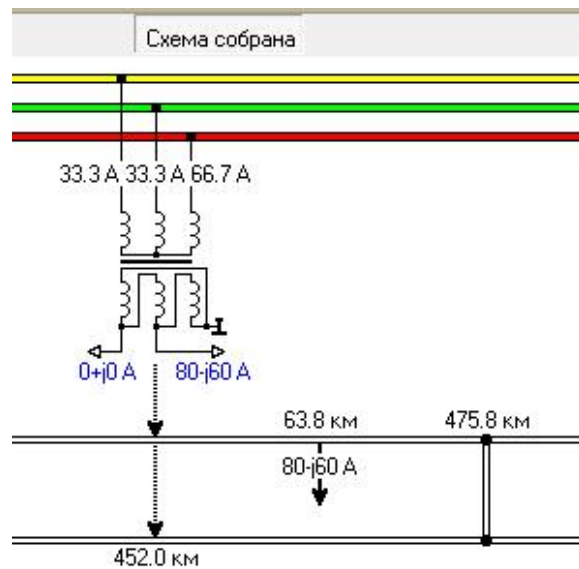


Рисунок 2.15 - Остаточна схема розрахунку

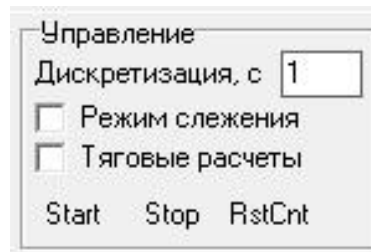


Рисунок 2.16 - Панель «Управление» головного вікна програми

Для виводу результатів розрахунку у вигляді графічних залежностей необхідно на панелі «Графики» (рисунок 2.17) вибрати одну з запропонованих залежностей, і вона з'явиться в області побудови графіків (рисунок 2.18).

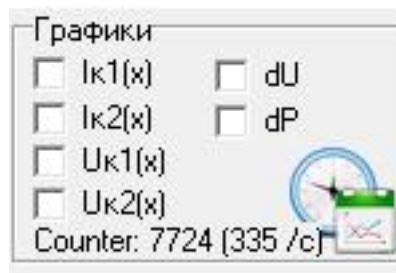


Рисунок 2.17 - Панель «Графики» головного вікна програми

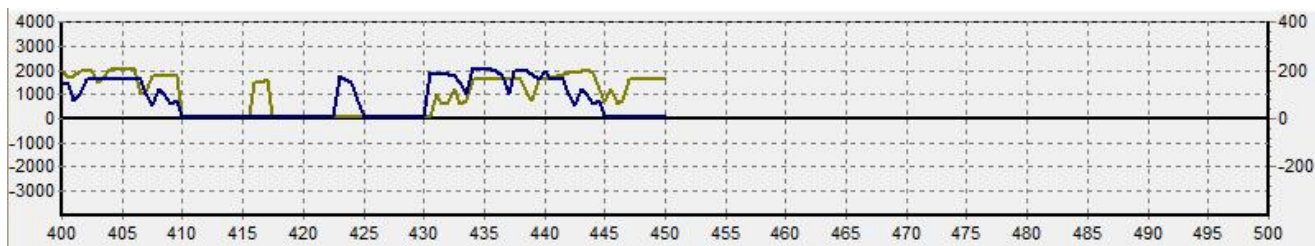


Рисунок 2.18 - Область побудови графічних залежностей

Після створення остаточної схеми та під час імітації руху поїздів можна спостерігати векторні діаграми струмів та напруг тягових підстанцій змінного струму (рисунки 2.19, 2.20).

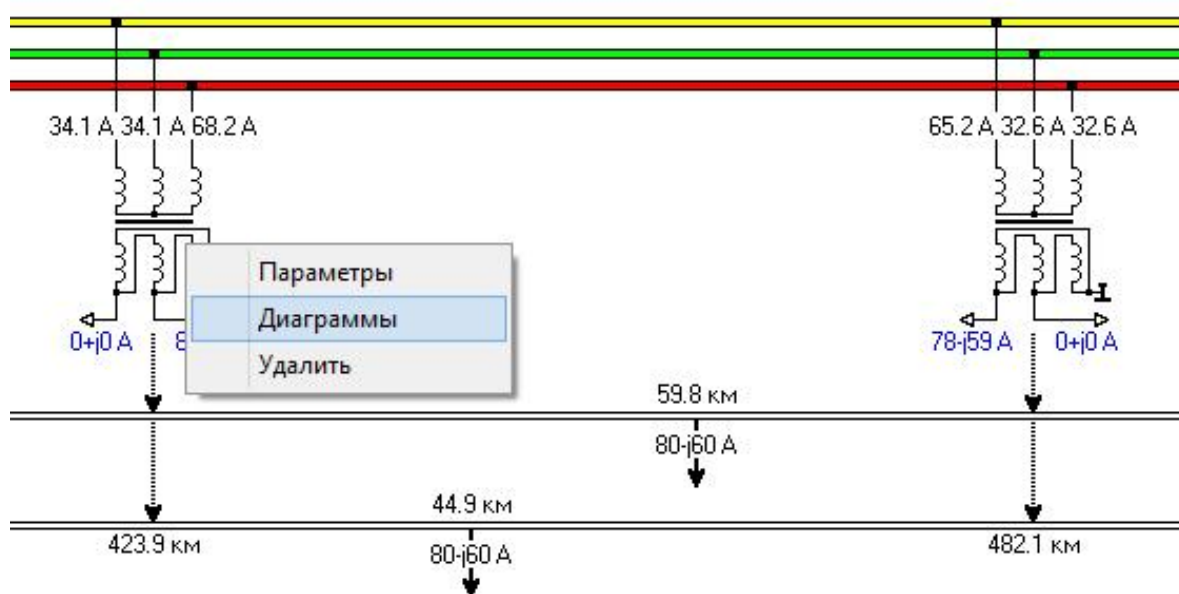


Рисунок 2.19 - Меню тягової підстанції

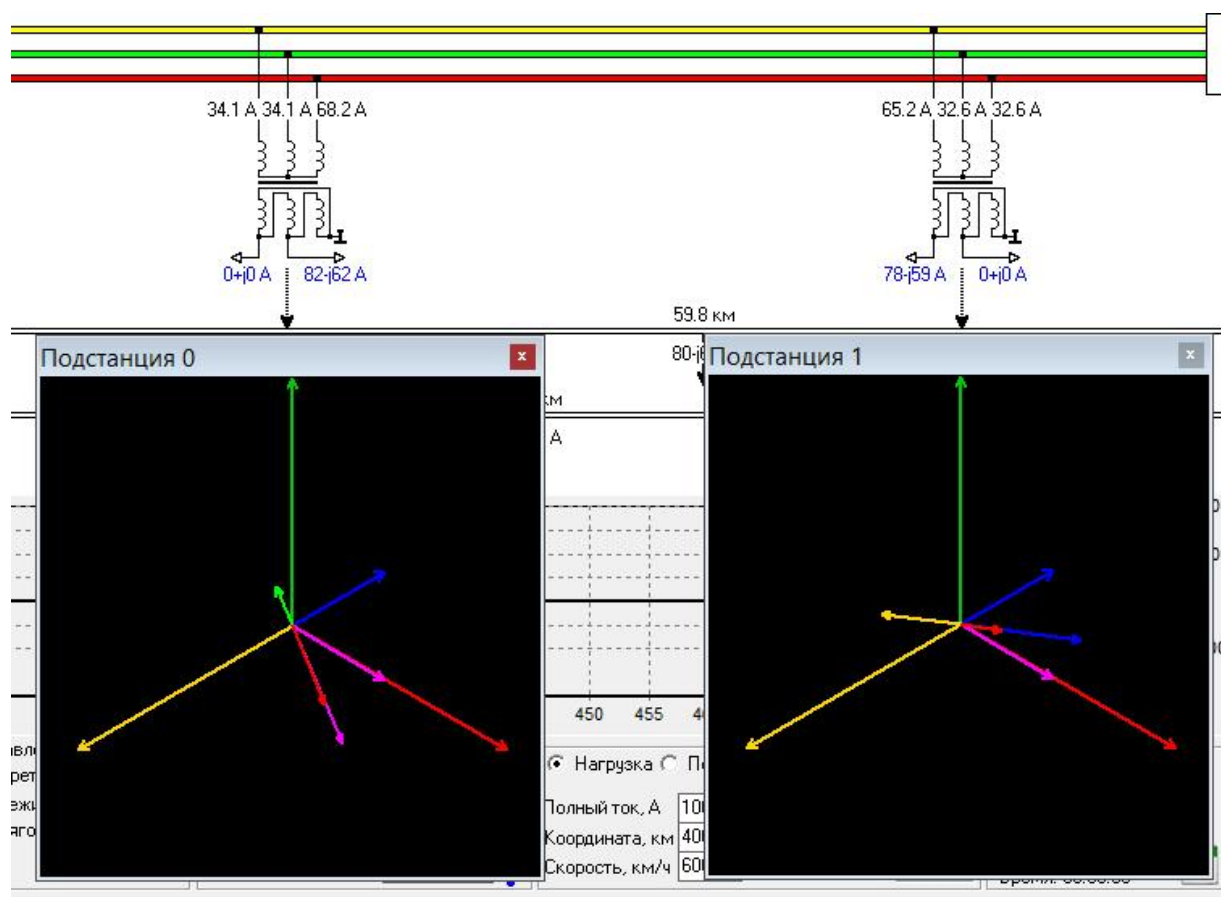


Рисунок 2.20 - Векторні діаграми

Для вибору режиму оптимізації потрібно на панелі «Меню» натиснути кнопку «Расчеты» і вибрати необхідний спосіб оптимізації (рисунок 2.21).

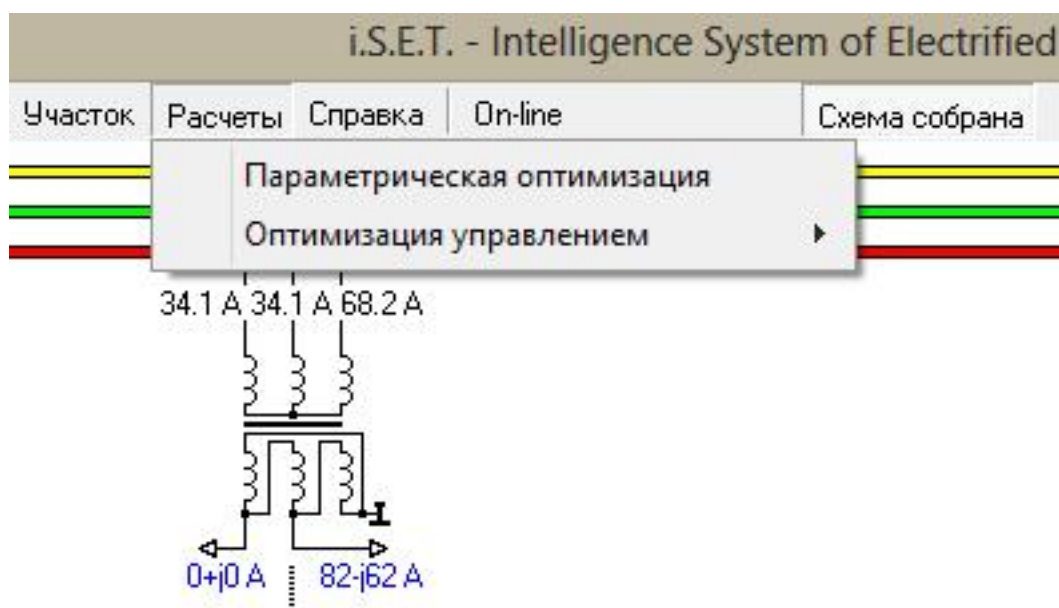


Рисунок 2.21 - Вибір способу оптимізації

При виборі режиму «Оптимизация управлением» виконується підсилення

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ

Арк.

47

системи тягового електропостачання установкою підсилюючих пунктів або системою стабілізації напруги в тяговій мережі (рисунок 2.22).

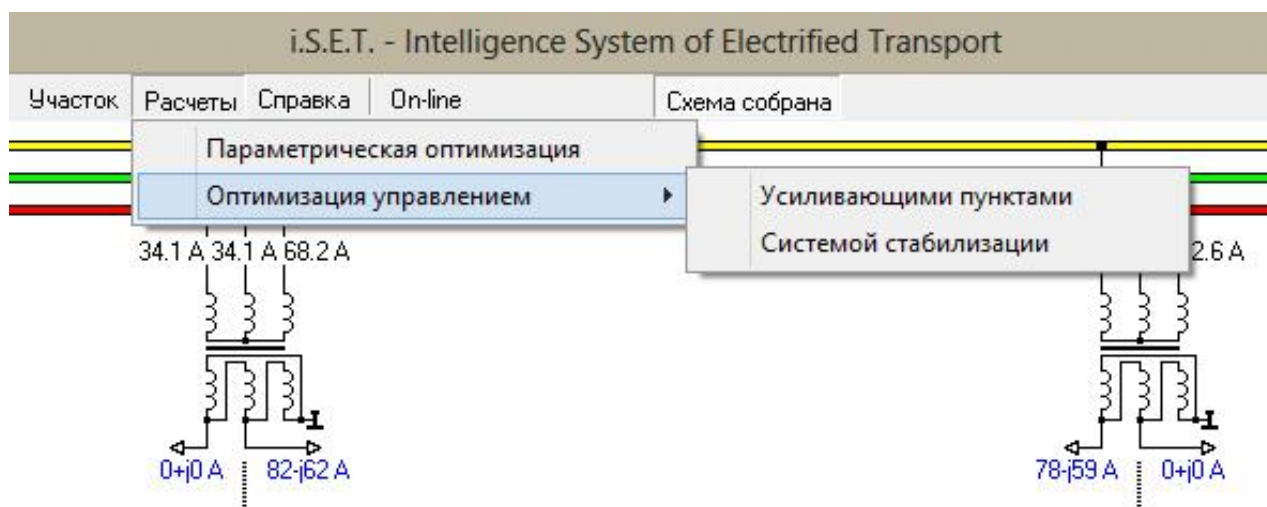


Рисунок 2.22 - Оптимізація керуванням

Перервати виконання розрахунків можна, натиснувши кнопку «Stop» (рисунок 2.16).

Для виходу з програми необхідно натиснути «Выход» в меню «Файл» або закрити вікно програми.

Програма може використовуватись студентами залізничних ВУЗів для виконання лабораторних робіт та розв'язування задач тягового електропостачання залізниць. Також може використовуватись під час роботи відповідних підрозділів залізниці для розрахунку, аналізу та оптимізації режимів роботи електрифікованих ділянок. Продукт не має вимог щодо часу збору даних. Вся інформація вводиться відповідним співробітником в ручному режимі з клавіатури. Користувачі можуть починати роботу з програмою одразу після її запуску.

### 3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СПОЖИВАЧА, ЯКИЙ ЖИВИТЬСЯ ВІД ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ЗАЛІЗНИЦІ

#### 3.1 Схема проведення дослідження

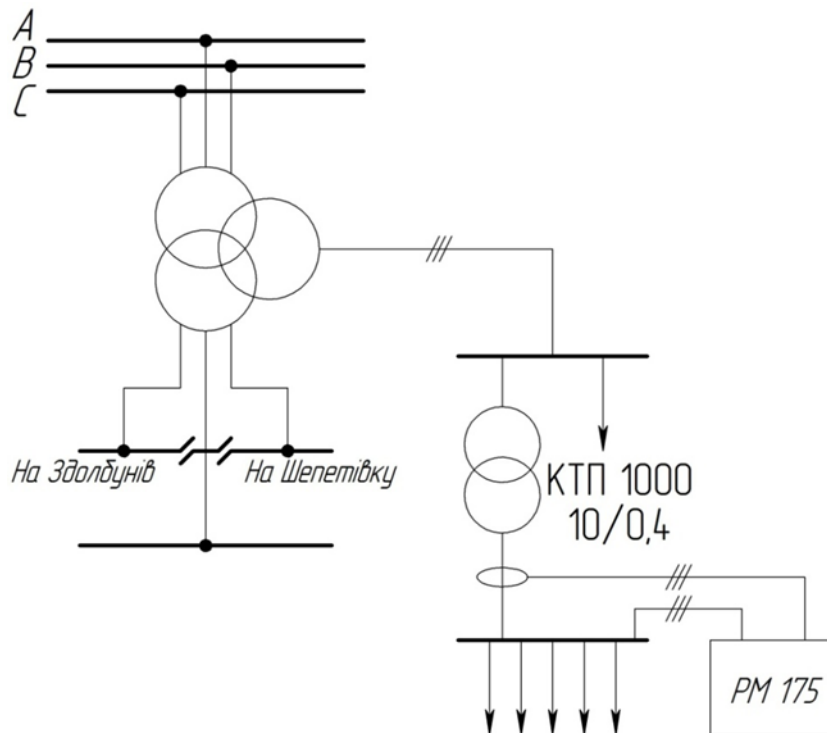


Рисунок 3.1 - Схема проведення вимірювань

Схема проведення вимірювань в першому періоді приведена на рисунку 3.1.

На даній схемі дослідження ми бачимо систему електропостачання змінного струму. На ній від мережі змінного струму завдяки трьохобмотковому трансформатору отримує живлення електрифікована ділянка залізниці і також нетяговий споживач.

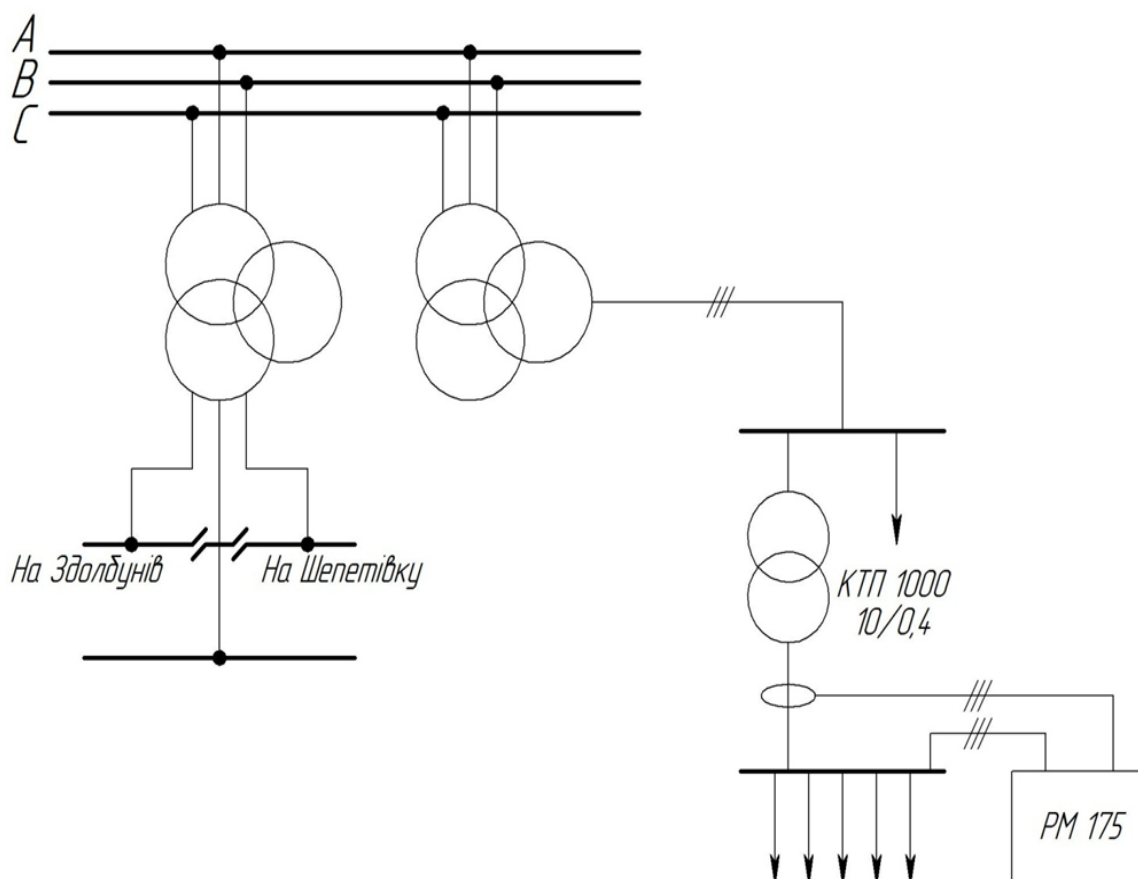


Рисунок 3.2 - Схема проведення вимірювань

На даній схемі ми бачимо другий період дослідження систему електропостачання змінного струму . Тут вже змінюються умови дослідження. Тепер ми використовуємо два трьохобмоткових трансформаторів. Один трансформатор живить електрифіковану ділянку залізниці, а інший забезпечує електроенергією споживача.

### 3.2 Режими роботи системи електропостачання залізниці

Електричні навантаження систем електропостачання визначають для вибору числа і потужності силових трансформаторів, потужності і місця підключення компенсуючих пристроїв, вибору і перевірки струмоводів за умовою припустимого нагрівання, розрахунку втрат і коливань напруги і вибору релейного захисту. Під максимальним (розрахунковим) навантаженням розуміють найбільше значення навантаження елементів системи електропостачання, усереднене за інтервал часу, за який температура цих елементів досягає сталого значення. Для графіків, тривалість циклу яких не перевершує трьох постійних часу нагрівання

елемента мережі, розрахункове навантаження може бути прийняте рівним ефективному, тобто середньоквадратичному навантаженню.

Визначення максимальних навантажень виконується в два етапи. На першому етапі визначається навантаження окремих електроприймачів, окремих цехів і виробничих ділянок, а також усього підприємства.

На цьому етапі розрахунку припускають відсутність джерел реактивної потужності в системі електропостачання. Результати першого етапу розрахунку електричних навантажень використовуються як вихідні дані для вибору числа і потужності силових трансформаторів з одночасним визначенням потужності і місць підключення компенсуючих пристроїв, відповідно до «Вказівок по проектуванню компенсації реактивної потужності в електричних мережах промислових підприємств».

На другому етапі розраховують електричні навантаження всієї мережі з урахуванням потужності і місця підключення компенсуючих пристроїв і ступеня використання реактивної потужності синхронних двигунів (СД).

### 3.3 Обробка та аналіз результатів дослідження

Таблиця 3.1 Результати вимірювання показників якості електричної енергії

| Показник                    | Виміряне значення |         |        | Норми згідно ГОСТ 13109-97   |                             | Відносний час виходу показників з інтервалу |                             |
|-----------------------------|-------------------|---------|--------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|
|                             | min               | середнє | max    | нормально допустиме значення | гранично допустиме значення | нормально допустимих значень                | гранично допустимих значень |
| Значення напруги фази АВ, В | 385,82            | 409,04  | 425,22 | 361 – 399                    | 342 – 418                   | 94,7 %                                      | 5,2 %                       |
| Значення напруги фази ВС, В | 392,52            | 412,48  | 425,48 |                              |                             | 99,8 %                                      | 12,5 %                      |
| Значення напруги фази СА, В | 387,14            | 408,42  | 423,75 |                              |                             | 95,4 %                                      | 4,5 %                       |

Продовження таблиці 3.1

|                                                           |       |      |       |           |           |        |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|------|-------|-----------|-----------|--------|-------|
| Усталене відхилення напруги прямої послідовності, %       | 2,94  | 7,89 | 11,75 | ±5 %      | ±10 %     | 98,4 % | 5,5 % |
| Коефіцієнт несиметрії по зворотній послідовності, %       | 0,00  | 1,37 | 5,20  | 2,0       | 4,0       | 18,9 % | 0,4 % |
| Коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги фази А, % | 0,90  | 3,37 | 9,80  | 8,0       | 12,0      | 0,41 % | 0 %   |
| Коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги фази В, % | 0,80  | 2,33 | 7,10  |           |           | 0 %    | 0 %   |
| Коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги фази С, % | 0,70  | 2,85 | 9,10  |           |           | 0,21 % | 0 %   |
| Значення частоти, Гц                                      | 49,91 | 50,0 | 50,07 | 49,8–50,2 | 49,6–50,4 | 0 %    | 0 %   |

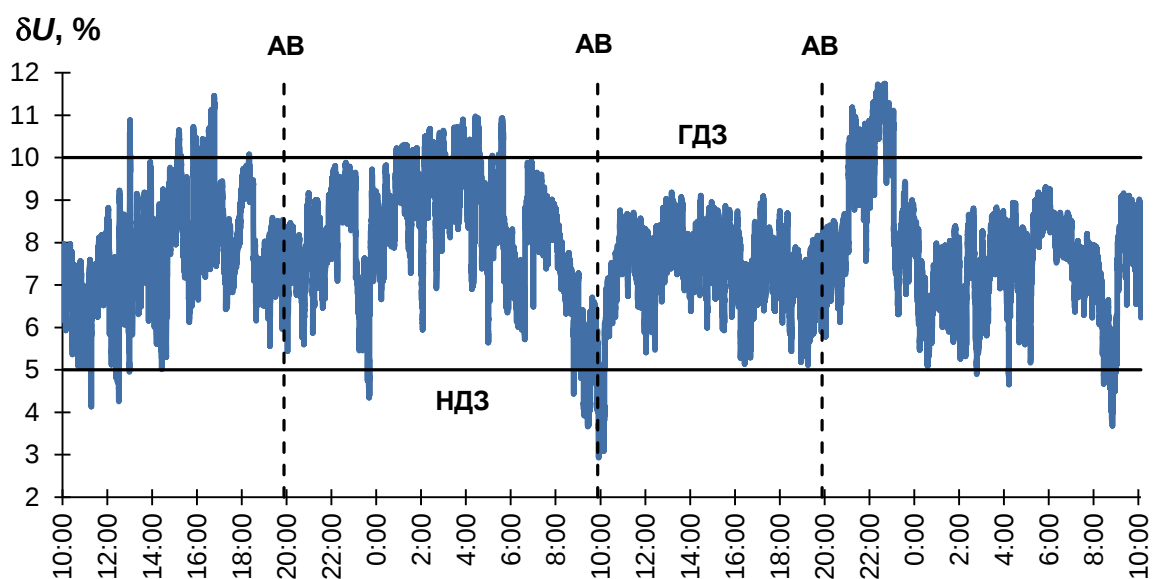


Рисунок 3.3 - Усталене відхилення напруги

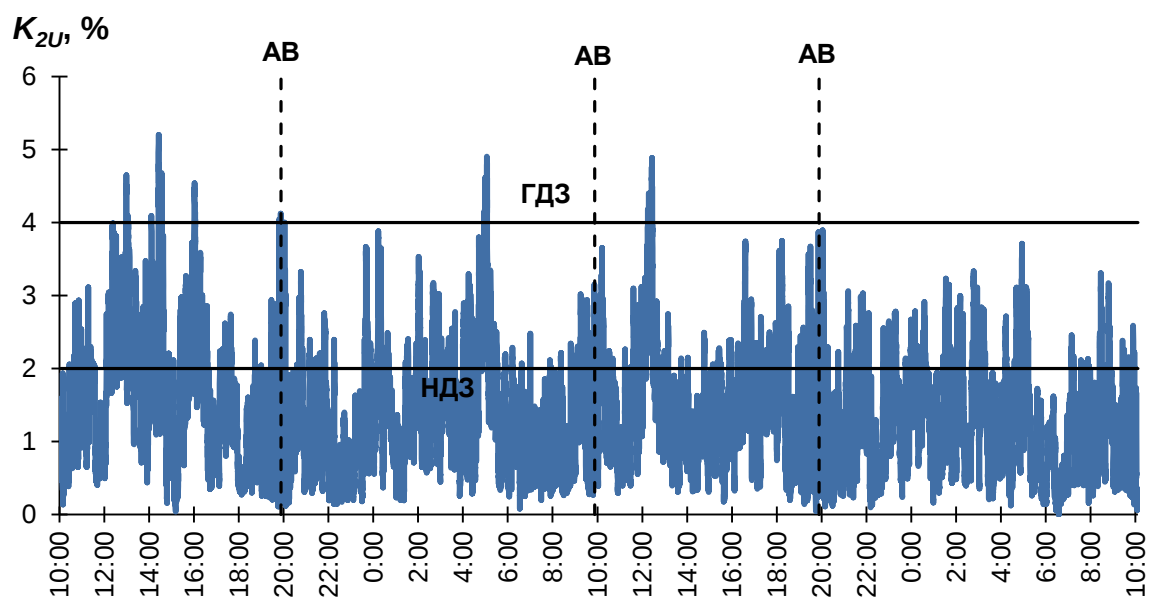


Рисунок 3.4 - Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю

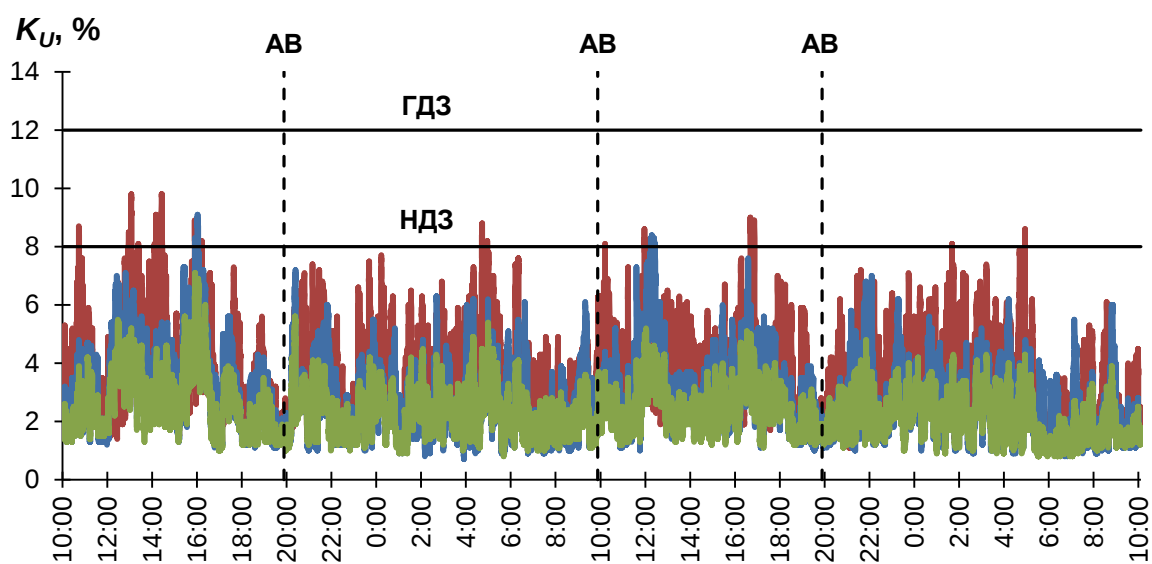


Рисунок 3.5 - Коефіцієнти спотворення синусоїдності напруги

|      |      |          |        |      |
|------|------|----------|--------|------|
|      |      |          |        |      |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ

Арк.

53

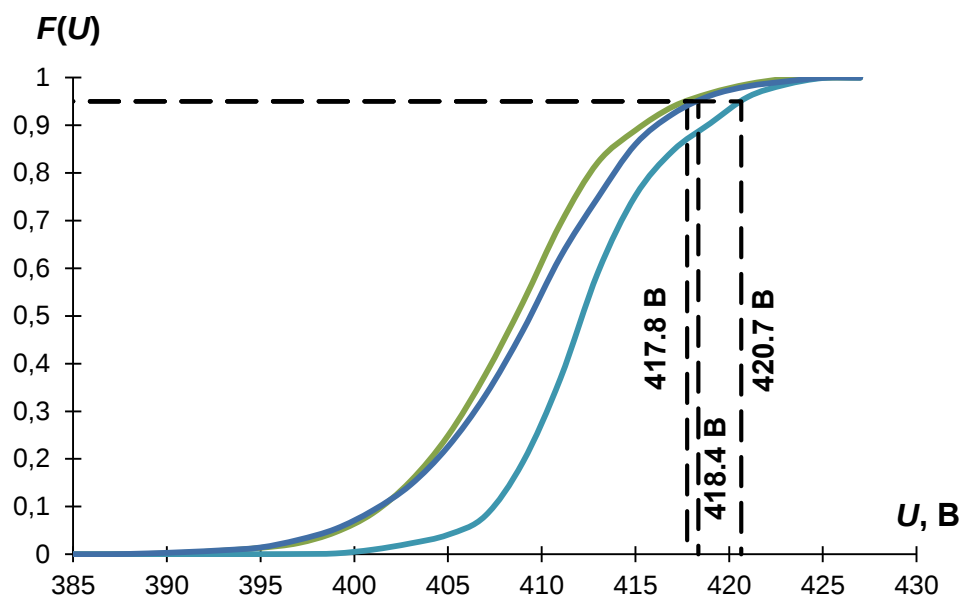


Рисунок 3.6 - Інтегральні функції розподілу напруги та значення з імовірністю 95 %

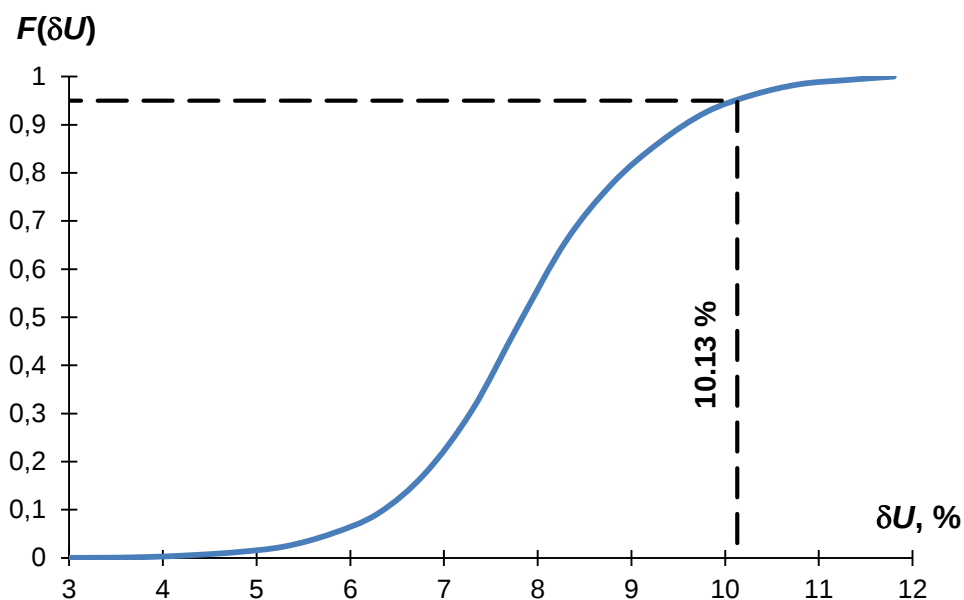


Рисунок 3.7 - Інтегральна функція розподілу усталеного відхилення напруги та значення з імовірністю 95 %

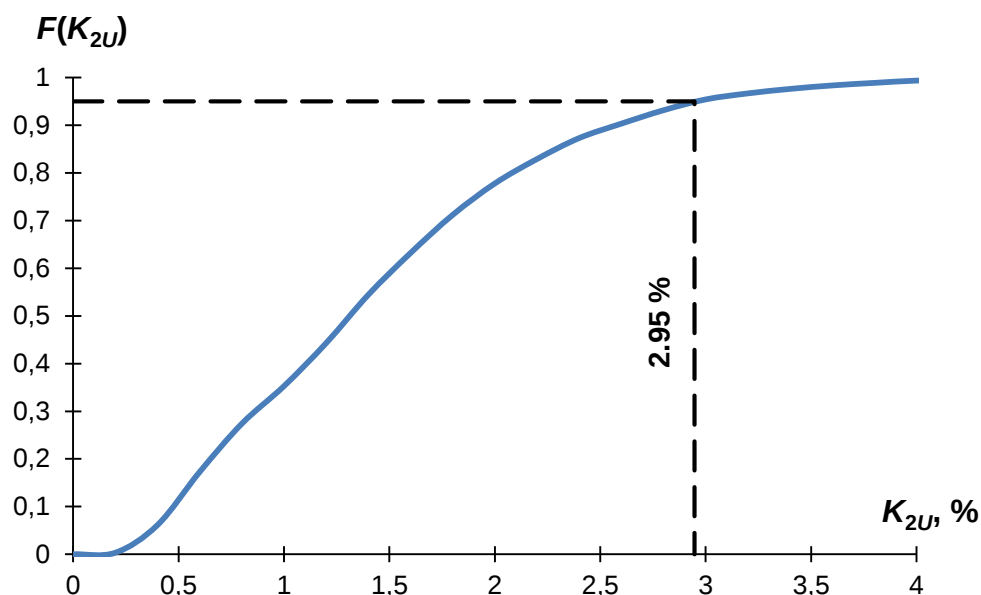


Рисунок 3.8 - Інтегральна функція розподілу коефіцієнта несиметрії напруги та значення з імовірністю 95 %

Зафіксовані аварійні відключення автоматики частотного перетворювача мають виражений періодичний характер, які за часом співпадають з графіком руху швидкісних поїздів фідерною ділянкою, що живиться від ПС Славута-тягова (табл. 3.2). А саме,

- відключення 15.12.2015 19:49 співпадає з рухом поїзду № 742 (743);
- відключення 16.12.2015 09:52 співпадає з рухом поїзду № 741;
- відключення 16.12.2015 19:49 співпадає з рухом поїзду № 742 (743).

Нормально встановленою для ділянки залізниці від тягової підстанції ПС Славута-тягова є консольно-петлева схема. На тяговій підстанції пристрій компенсації реактивної потужності знаходиться у непрацездатному стані.

Таблиця 3.2 Розклад руху поїздів в часи відключення автоматики по ст. Славута

| Дата | № поїзда | Назва / маршрут прямування | Час                               |                     | Час                     |                             |
|------|----------|----------------------------|-----------------------------------|---------------------|-------------------------|-----------------------------|
|      |          |                            | Відправлення із сусідньої станції | Прибуття на станцію | Відправлення зі станції | Прибуття на сусідню станцію |
|      |          |                            |                                   |                     |                         |                             |

Продовження таблиці 3.2

|          |     |                                                       |       |       |       |       |
|----------|-----|-------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 15.12.15 | 742 | Інтерсіті +<br>Трускавець,<br>Львів, Київ,<br>Дарниця | 19:31 | 19:37 | 19:37 | 19:41 |
| 15.12.15 | 743 | Інтерсіті +<br>Дарниця,<br>Київ, Львів                | 20:08 | 20:11 | 20:11 | 20:17 |
| 16.12.15 | 741 | Інтерсіті +<br>Дарниця,<br>Київ, Львів,<br>Трускавець | 9:47  | 9:51  | 9:51  | 9:58  |
| 16.12.15 | 742 | Інтерсіті +<br>Трускавець,<br>Львів, Київ,<br>Дарниця | 19:30 | 19:37 | 19:37 | 19:42 |
| 16.12.15 | 743 | Інтерсіті +<br>Дарниця,<br>Київ, Львів                | 20:07 | 20:11 | 20:11 | 20:17 |
| 16.12.15 | 744 | Інтерсіті +<br>Львів, Київ,<br>Дарниця                | 7:55  | 8:02  | 8:02  | 8:06  |

В періоди часу, які вказані в табл.3.3 мають місце «пилоподібні» спотворення синусоїдності напруги . Тривалість виникнення вказаних гармонійних складових відповідає часу ходу поїзда фідерними зонами, а саме

15.12.2015 – 11 хв. 40 с.

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

Таблиця 3.3 Періоди виникнення «пилоподібних» спотворень синусоїдності

| Дата     | Початок  | Закінчення |
|----------|----------|------------|
| 15.12.15 | 20:12:47 | 20:24:27   |
| 16.12.15 | 07:49:16 | 07:56:36   |
|          | 19:48:44 | 19:57:05   |
|          | 20:12:05 | 20:34:25   |
|          | 21:36:26 | 21:53:46   |

Таблиця 3.4 Результати вимірювання показників якості електричної енергії

| Показник                                                  | Виміряне значення |         |        | Норми згідно ГОСТ 13109-97   |                             | Відносний час виходу показників з інтервалу |                             |
|-----------------------------------------------------------|-------------------|---------|--------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|
|                                                           | min               | середнє | max    | нормально допустиме значення | гранично допустиме значення | нормально допустимих значень                | гранично допустимих значень |
| Значення напруги фази АВ, В                               | 395,08            | 403,56  | 415,35 | 361 – 399                    | 342 – 418                   | 96,4 %                                      | 0 %                         |
| Значення напруги фази ВС, В                               | 397,77            | 403,46  | 414,31 |                              |                             | 99,1 %                                      | 0 %                         |
| Значення напруги фази СА, В                               | 394,30            | 402,03  | 413,18 |                              |                             | 87,6 %                                      | 0 %                         |
| Усталене відхилення напруги прямої послідовності, %       | 4,26              | 6,06    | 9,01   | ±5 %                         | ±10 %                       | 96,0 %                                      | 0 %                         |
| Коефіцієнт несиметрії по зворотній послідовності, %       | 0,00              | 0,31    | 1,08   | 2,0                          | 4,0                         | 0 %                                         | 0 %                         |
| Коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги фази А, % | 0,00              | 1,53    | 3,80   | 8,0                          | 12,0                        | 0 %                                         | 0 %                         |
| Коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги фази В, % | 0,00              | 1,33    | 2,50   |                              |                             | 0 %                                         | 0 %                         |
| Коефіцієнт спотворення синусоїдальності напруги фази С, % | 0,00              | 1,51    | 2,50   |                              |                             | 0 %                                         | 0 %                         |

Продовження таблиці 3.4

|                      |       |      |       |           |           |     |     |
|----------------------|-------|------|-------|-----------|-----------|-----|-----|
| Значення частоти, Гц | 49,94 | 50,0 | 50,07 | 49,8–50,2 | 49,6–50,4 | 0 % | 0 % |
|----------------------|-------|------|-------|-----------|-----------|-----|-----|

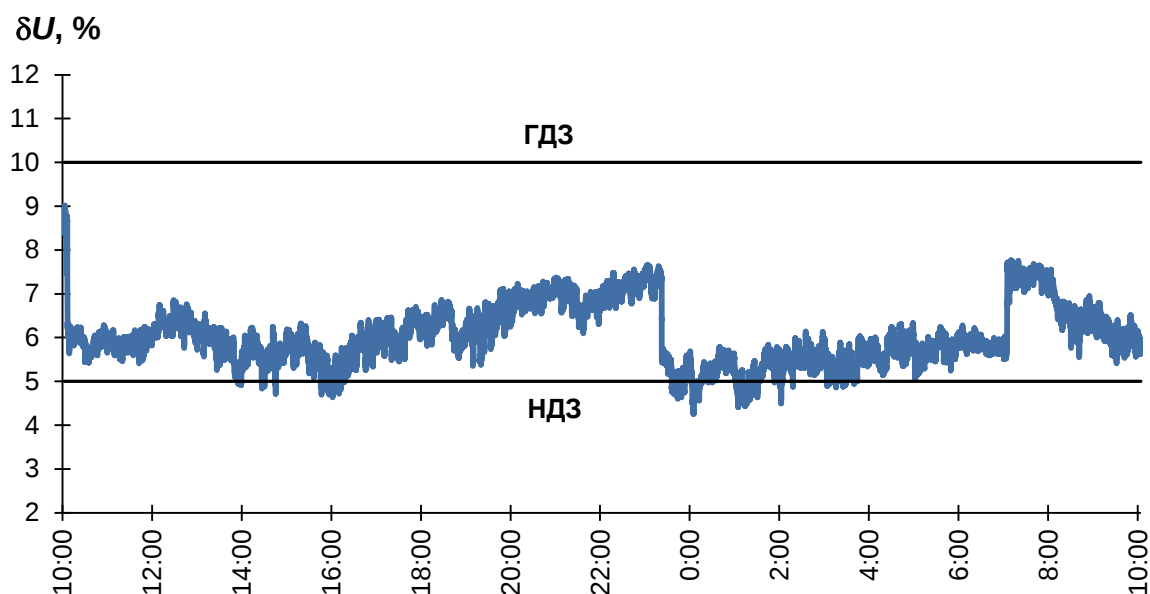


Рисунок 3.9 - Усталене відхилення напруги

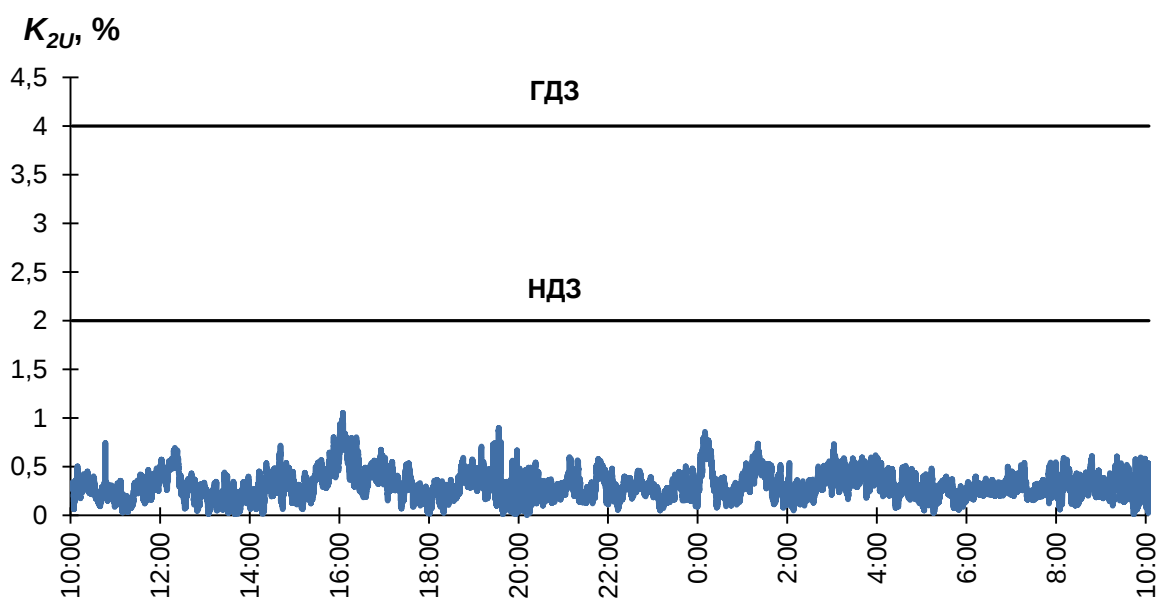


Рисунок 3.10 - Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю

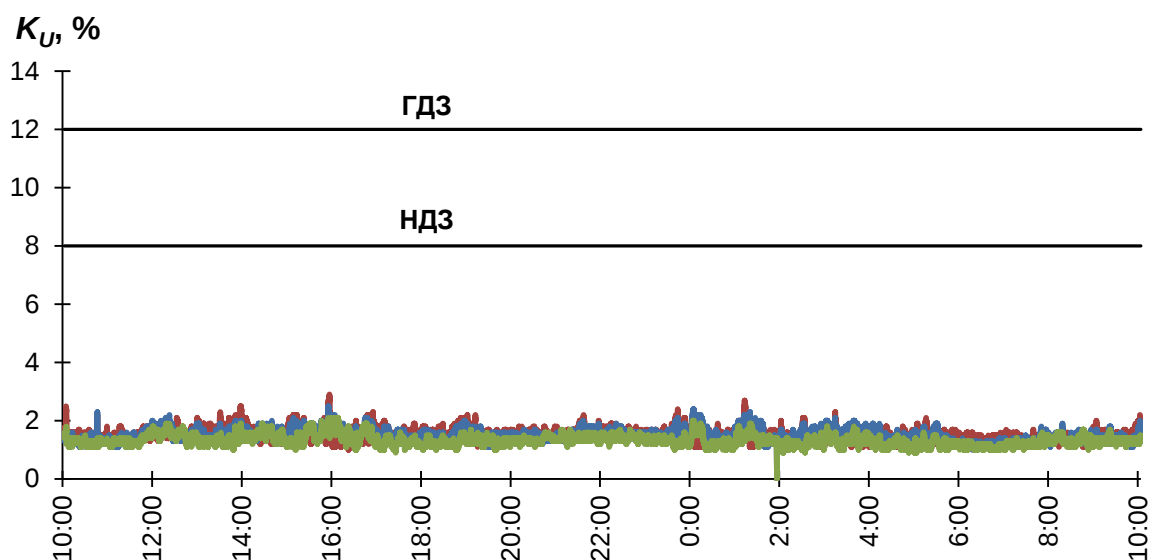


Рисунок 3.11 - Коефіцієнти спотворення синусоїдності напруги

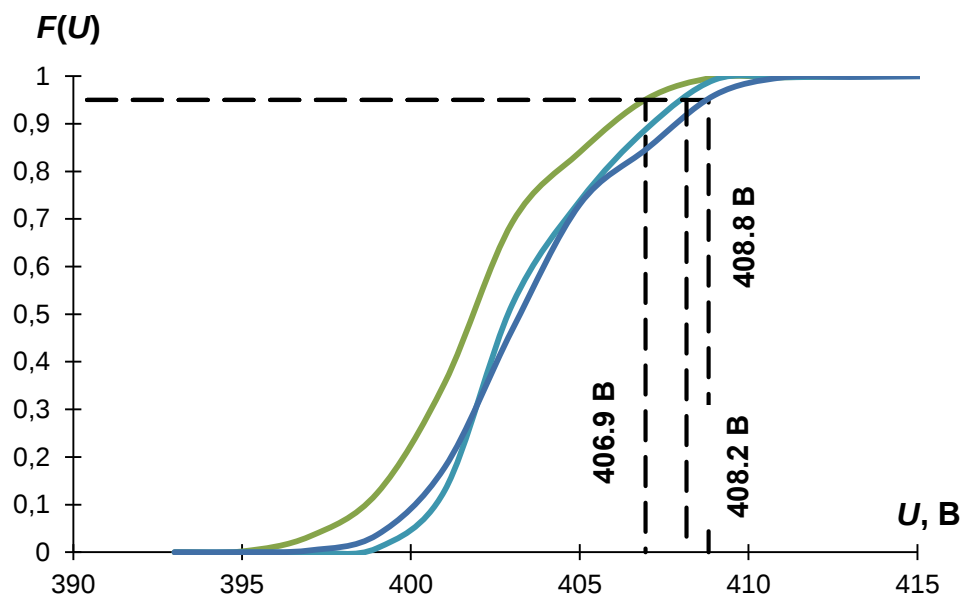


Рисунок 3.12 - Інтегральні функції розподілу напруги та значення з імовірністю 95 %

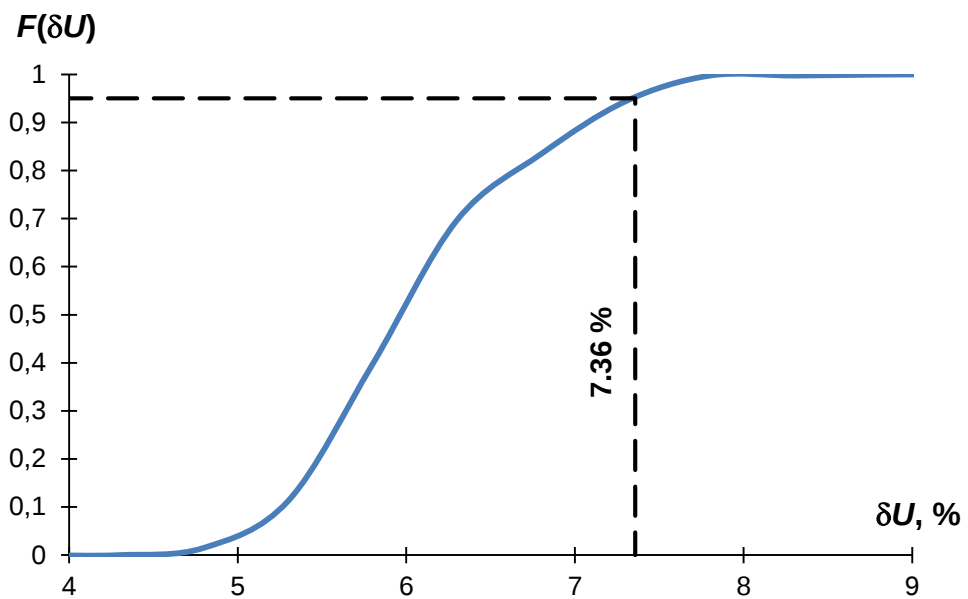


Рисунок 3.13 - Інтегральна функція розподілу усталеного відхилення напруги та значення з імовірністю 95 %

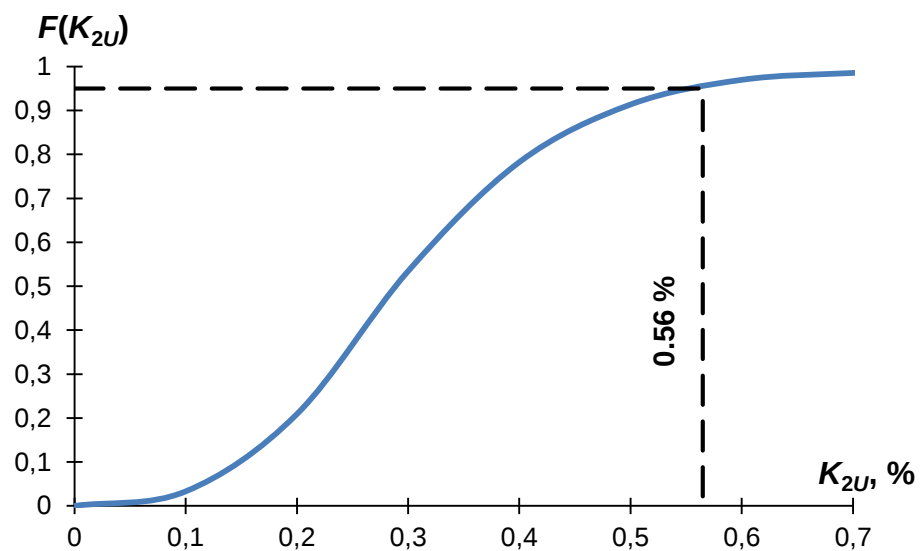


Рисунок 3.14 - Інтегральна функція розподілу коефіцієнта несиметрії напруги та значення з імовірністю 95 %

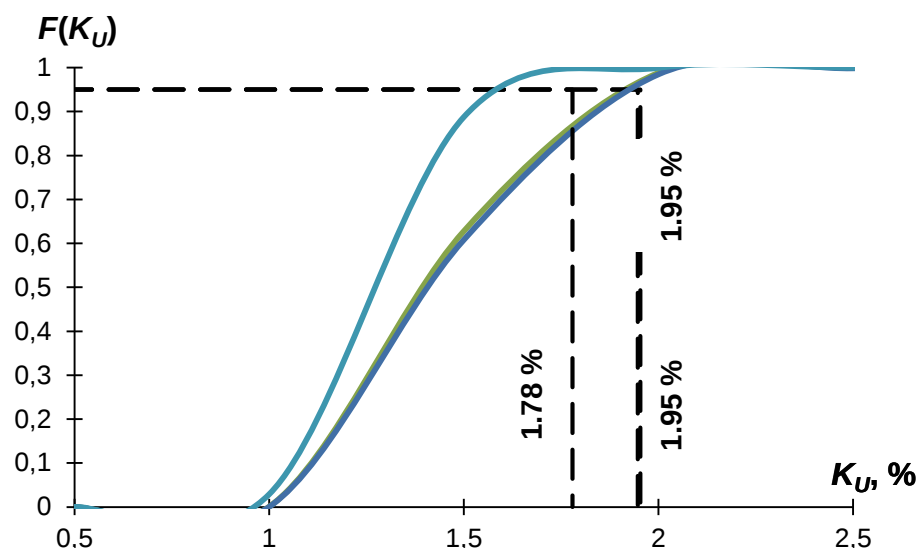


Рисунок 3.15 - Інтегральні функції розподілу коефіцієнта спотворення синусоїдності напруги та значення з імовірністю 95 %

Проаналізувавши результати дослідження можна дійти до певних висновків

1. За 1-й період проведення вимірювань зафіксовані порушення встановлених вимог до показників якості електроенергії стосовно усталеного відхилення напруги, коефіцієнта несиметрії напруги за зворотною послідовністю.

1.1. Значення коефіцієнта несиметрії напруги змінюються в межах від 0 до 5,2 %. За дослідний період часу зафіксовано перевищення нормального допустимого значення (2 %) на протязі 18,9 % інтервалу вимірювання. Тривалість перевищення гранично допустимого значення (4 %) складає 0,4 %.

1.2. Коефіцієнти спотворення синусоїдності кривої напруги змінюючись від 0,7 до 9,8 % в цілому відповідають діючим вимогам, оскільки відносний час виходу показників з інтервалу нормально допустимих значень не перевищує 5 %.

2. Співставляючи час відключення автоматики та виникнення порушень якості електричної енергії встановлюється однозначний зв'язок зі знаходженням на фідерних зонах тягової мережі швидкісних поїздів Інтерсіті+.

3. За 2-й період проведення вимірювань зафіксовані порушення встановлених вимог до показників якості електроенергії стосовно усталеного відхилення напруги, яке протягом 96 % інтервалу вимірювання перевищує нормально допустиме значення 5 %. Перевищення гранично допустимого значення (10 %) за цим показником не зафіксовано. Порушень за показниками несиметрії напруги та спотворення синусоїдності не зафіксовано.

3.1. Значення коефіцієнтів несиметрії напруги за зворотною послідовністю за дослідний період змінювались в межах від 0 до 1,08 %.

Значення коефіцієнта, що відповідає 95% інтегральній імовірності складає 0,56 % і не перевищує нормально допустимого значення.

3.2. Коефіцієнти спотворення синусоїдності напруги у фазах змінювались у межах від 0 до 2,5 % – 3,8 %. Перевищення ні нормально допустимого значення (8 %) ні гранично допустимого значення (12 %) не зафіксовано.

4. В цілому для схеми роздільного живлення тягового і районного навантаження (2-й період) дослідні показники якості електроенергії відповідають вимогам ГОСТ 13109-97 за винятком усталеного відхилення напруги, яке спричинене завищеним рівнем напруги в мережі.

5. Таким чином, узагальнюючи приведені результати, встановлено невідповідність якості електроенергії при роботі одного трансформатора на тяговій підстанції. Роздільне живлення тягового і районного навантаження за допомогою двох трансформаторів забезпечує відповідність показників несиметрії та спотворення синусоїдності напруги встановленим вимогам.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 62   |

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській роботі представлено дослідження кондуктивних перешкод, що виникають в системі тягового електропостачання змінного струму. Окрім кондуктивних перешкод в системі електропостачання існують різні види спотворення, що впливають на якість електропостачання. Для дослідження системи електропостачання використовують математичні і імітаційні моделі. Також, на ділянці електрифікованої залізниці був проведений дослід, що показав невідповідність якості електроенергії при роботі одного трансформатора на тяговій підстанції. Роздільне живлення тягового і районного навантаження за допомогою двох трансформаторів забезпечує відповідність показників несиметрії та спотворення синусоїдності напруги встановленим вимогам.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.EC2121.MP.2022 - ПЗ | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           | 63   |

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сиченко В.Г. Електропостачання швидкісних та високошвидкісних магістралей // Видання “Українські залізниці, № 5-6”, 2015 року
2. Земський Д.Р. Підвищення ефективності передачі електроенергії для нетягових споживачів електрифікованих залізниць змінного струму. - Дніпро, Дисертція, 2020. 194 с.
3. Фордзюн Д.М. Ідентифікація параметрів систем електричної тяги змінного струму. – Дніпро, Дипломна робота, 2019. 71 с
4. ДСТУ 32144-2013. Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. - М.: Держстандарт, 2012.
5. ДСТУ 2104-92 (ГОСТ 12965-93). Трансформатори силові масляні загального призначення класів напруги 110 і 150 кВ. Технічні умови. Офіц. вид.; чинний від 01.07.1993. Київ: Держстандарт України, 1992. 59 с.
6. ДСТУ 2105-92. Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови. Офіц. вид.; чинний від 01.07.1993. Київ: Держстандарт України, 1992. 41 с.
7. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT). Київ, ДП «УкрДНЦ», 2014, 32 с.
8. Босий Д. О., Земський Д. Р. Підвищення якості електроенергії у лініях «два проводи-рейка». Електрифікація транспорту. № 12. С. 76-81.
9. Транспортна стратегія України на період до 2020 року // Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 21.12.2010р. №2818-VI.
10. Про схвалення Стратегії розвитку залізничного транспорту на період до 2020 року // Кабінет Міністрів України. Розпорядження від 16 грудня 2009р. №1555-Р.
11. Ягуп В.Г. Моделювання та оптимізація режимів систем електропостачання та електропоживання/ В.Г. Ягуп, К.В. Ягуп. – ХНАМГ, 2019, 182 с.

|      |      |          |        |      |                           |      |
|------|------|----------|--------|------|---------------------------|------|
|      |      |          |        |      | 02.15.ЕС2121.МР.2022 - ПЗ | Арк. |
|      |      |          |        |      |                           | 64   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                           |      |