

# КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(освітній ступінь (освітньо-кваліфікаційний рівень))

на тему: **Забезпечення надійності системи електропостачання цеху з ремонту електровозів локомотивного депо**

Виконав(ла): студент(ка) VI курсу, групи ЕТм-61  
спеціальності 141

Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

|                   |                                                                                 |
|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                   | <div>Макарчук Г. О.</div> <div>(підпис)</div> <div>(прізвище та ініціали)</div> |
|                   | <div>Чміль І.В.</div> <div>(підпис)</div> <div>(прізвище та ініціали)</div>     |
| Керівник          | <div>Сисак І.М.</div> <div>(підпис)</div> <div>(прізвище та ініціали)</div>     |
| Нормоконтроль     | <div>Коваль В.П.</div> <div>(підпис)</div> <div>(прізвище та ініціали)</div>    |
| Завідувач кафедри | <div>Коваль В.П.</div> <div>(підпис)</div> <div>(прізвище та ініціали)</div>    |
| Рецензент         | <div></div> <div>(підпис)</div> <div>(прізвище та ініціали)</div>               |

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

(підпис) (прізвище та ініціали)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Макарчука Григорія Олександрович  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Забезпечення надійності системи електропостачання цеху з ремонту електровозів локомотивного депо

Керівник роботи Сисак Іван Михайлович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» листопада 2025 року № 4/7-966

2. Термін подання студентом завершеної роботи Грудень 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Потужність споживачів, перелік споживачів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

1. Презентація

2.

3.

4.

5.

6.

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ                                            | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                                                   |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | Гурик О. Я. к.т.н., доцент                |                |                  |
|                                                   | Теслюк В.М., проректор                    |                |                  |
| Нормоконтроль                                     | Коваль В.П., к.т.н., зав. кафедри ЕІ      |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи                               | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Вступ                                             |                                |          |
| 2     | Аналітичний розділ                                |                                |          |
| 3     | Розрахунково-дослідницький розділ                 |                                |          |
| 4     | Проектно-конструкторський розділ                  |                                |          |
| 5     | Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях |                                |          |
| 6     | Висновки                                          |                                |          |
| 7     | Оформлення пояснювальної записки                  |                                |          |
| 8     | Оформлення графічної частини                      |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Макарчук Г.О.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Сисак І.М.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра Електричної інженерії  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри

(підпис) (прізвище та ініціали)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр  
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(шифр і назва спеціальності)

студенту Чміля Іллі Володимировича  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Забезпечення надійності системи електропостачання цеху з ремонту електровозів локомотивного депо

Керівник роботи Сисак Іван Михайлович, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «12» листопада 2025 року № 4/7-966

2. Термін подання студентом завершеної роботи Грудень 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Потужність споживачів, перелік споживачів

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Розрахунково-дослідницький розділ

3. Проектно-конструкторський розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

1. Презентація

2.

3.

4.

5.

6.

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ                                            | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|                                                   |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
| Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | Гурик О. Я. к.т.н., доцент                |                |                  |
|                                                   | Теслюк В.М., проректор                    |                |                  |
| Нормоконтроль                                     | Коваль В.П., к.т.н., зав. кафедри ЕІ      |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |
|                                                   |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів роботи                               | Термін виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|---------------------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 1     | Вступ                                             |                                |          |
| 2     | Аналітичний розділ                                |                                |          |
| 3     | Розрахунково-дослідницький розділ                 |                                |          |
| 4     | Проектно-конструкторський розділ                  |                                |          |
| 5     | Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях |                                |          |
| 6     | Висновки                                          |                                |          |
| 7     | Оформлення пояснювальної записки                  |                                |          |
| 8     | Оформлення графічної частини                      |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |
|       |                                                   |                                |          |

Студент

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Чміль І.В.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Сисак І.М.

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

Макарчук Г.О. Забезпечення надійності системи електропостачання цеху з ремонту електровозів локомотивного депо. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. ТНТУ імені Івана Пулюя. ФПТ. Кафедра ЕІ, група ЕТм-61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2025.

Стор. – 124; рис. – 19; табл. – 15; креслень - ; джерел - 36; додатків - 0.

На основі вихідних даних та довідникових коефіцієнтів визначено розрахункові активні, реактивні та повні навантаження цеху по ремонту електровозів із урахуванням режимів роботи електроприймачів і освітлювального навантаження. Отримані значення розрахункових струмів створюють основу для подальшого вибору перерізів кабельних ліній, комутаційної та захисної апаратури. Виконано розрахунки електричних навантажень підприємства у цілому, що дало змогу оцінити сумарні потужності, необхідні для вибору трансформаторів, розподільних мереж та обладнання головної понижаючої підстанції. Побудова картограми навантажень і визначення центру електричних навантажень дозволили раціонально розмістити цехові трансформаторні підстанції та ГПП з мінімізацією втрат електроенергії та довжин ліній живлення. На підставі розрахованої густини навантаження обґрунтовано вибір кількості та номінальної потужності трансформаторів цехових підстанцій, забезпечивши допустимі коефіцієнти їх завантаження для споживачів різних категорій надійності. Запропонований розподіл трансформаторів по цехах відповідає вимогам надійності електропостачання та зручності експлуатації. Проведено розрахунок і вибір засобів КРП на шинах 0,4 кВ цехових підстанцій та на шинах 10 кВ ГПП. Запропоновано використання конденсаторних установок з оптимальним розподілом їх потужності як по підстанціях, так і по вузлах навантаження, що обмежує зниження перетоків реактивної потужності, зменшення втрат у мережах та підвищення коефіцієнта потужності системи електропостачання.

**Ключові слова:** надійність, СЕП, цех, локомотивне депо.

## РЕФЕРАТ

Чміль І.В. Забезпечення надійності системи електропостачання цеху з ремонту електровозів локомотивного депо. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. ТНТУ імені Івана Пулюя. ФПТ. Кафедра ЕІ, група ЕТм-61. – Тернопіль.: ТНТУ, 2025.

Стор. – 124; рис. – 19; табл. – 15; креслень - ; джерел - 36; додатків - 0.

Розроблено схему зовнішнього електропостачання підприємства від підстанції енергосистеми напругою 35 кВ із застосуванням двох радіальних повітряних ліній, що забезпечує необхідний рівень резервування. Обґрунтовано розміщення головної понижаючої підстанції (ГПП) на території підприємства та вибір двох силових трансформаторів типу ТДНС-10000/35, що відповідають розрахунковому навантаженню і режимам роботи мережі. Для внутрішньозаводської електричної мережі 10 кВ застосовано радіальну схему з кабельними лініями з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Виконано вибір перерізів кабелів за економічною густиною струму та умовами допустимого нагріву в нормальному і післяаварійному режимі. Підтверджено, що обрані перерізи кабелів забезпечують надійну роботу у мережі без перевищення допустимих струмів. Проведено розрахунок струмів КЗ у мережі вище 1000 В для характерних точок схеми. За отриманими значеннями виконано перевірку термічної та електродинамічної стійкості кабельних ліній і електрообладнання, що підтвердило правильність прийнятих технічних рішень. На основі результатів розрахунків обрано високовольтні вимикачі, трансформатори струму та напруги, а також вимірювальні прилади, які задовольняють вимоги по номінальних параметрах і стійкості до струмів КЗ. У мережі до 1000 В здійснено розподіл електроприймачів по пунктах живлення, вибір розподільчих шаф та АВ для захисту окремих електричних приймачів, групових ліній та вводів. Перевірено узгодження апаратів захисту з перерізами провідників, що забезпечує селективність, надійний захист від перевантажень і коротких замикань.

**Ключові слова:** надійність, СЕП, цех, локомотивне депо.

## ЗМІСТ

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП                                                                | 11 |
| 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ                                                | 15 |
| 1.1 Компенсація реактивної потужності                                | 15 |
| 1.1.1 Методи компенсації реактивної потужності                       | 16 |
| 1.1.1.1 Статичні конденсаторні установки                             | 16 |
| 1.1.1.1.1 Загальна характеристика статичних конденсаторних установок | 16 |
| 1.1.1.1.2 Принцип роботи та математичні основи компенсації           | 19 |
| 1.1.1.1.3 Конструктивне виконання СКУ                                | 20 |
| 1.1.1.1.4 Види статичних конденсаторних установок                    | 20 |
| 1.1.1.1.4.1 Установки з фіксованою потужністю                        | 20 |
| 1.1.1.1.4.2 Ступінчасті СКУ з автоматичним регулюванням              | 21 |
| 1.1.1.1.4.3 Антигармонічні СКУ                                       | 21 |
| 1.1.1.1.5 Переваги впровадження СКУ                                  | 22 |
| 1.1.1.1.6 Недоліки та особливості застосування                       | 22 |
| 1.1.1.1.7 Галузі застосування                                        | 23 |
| 1.1.1.2 Автоматизовані конденсаторні установки                       | 24 |
| 1.1.1.2.1 Призначення та область застосування АКУ                    | 28 |
| 1.1.1.2.2 Структура та принцип роботи автоматизованих установок      | 28 |
| 1.1.1.2.3 Типи автоматизованих конденсаторних установок              | 29 |
| 1.1.1.2.3.1 Установки з контакторною комутацією                      | 29 |
| 1.1.1.2.3.2 Тиристорні (реактори швидкого вмикання)                  | 30 |
| 1.1.1.2.3.3 АКУ із реакторним захистом (антигармонічні установки)    | 30 |
| 1.1.1.2.4 Переваги застосування АКУ                                  | 31 |
| 1.1.1.2.5 Умови вибору та проектування АКУ                           | 31 |



|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1.1.2.6 Особливості експлуатації та обслуговування                  | 32 |
| 1.1.1.3 Тиристорні компенсатори реактивної потужності (TSC/TCR)       | 32 |
| 1.1.1.3.1 Призначення та область застосування TSC/TCR                 | 33 |
| 1.1.1.3.2 Структура та принцип роботи тиристорних компенсаторів       | 33 |
| 1.1.1.3.3 Переваги TSC/ TCR у порівнянні з традиційними АКУ           | 34 |
| 1.1.1.3.4 Взаємодія TSC/TCR з мережами, що містять гармоніки          | 35 |
| 1.1.1.3.5 Режим роботи тиристорного компенсатора                      | 35 |
| 1.1.1.3.6 Конструктивні типи та класифікація                          | 36 |
| 1.1.1.3.7 Переваги та недоліки TSC/TCR                                | 36 |
| 1.1.1.3.8 Економічна ефективність застосування                        | 37 |
| 1.1.1.4 Статичні ВАР-компенсатори (SVC)                               | 37 |
| 1.1.1.4.1 Призначення та область застосування SVC                     | 38 |
| 1.1.1.4.2 Структура та принцип дії SVC                                | 39 |
| 1.1.1.4.3 Типи SVC                                                    | 40 |
| 1.1.1.4.4 Алгоритми регулювання в SVC                                 | 40 |
| 1.1.1.4.5 Переваги застосування SVC                                   | 41 |
| 1.1.1.4.6 Недоліки та обмеження                                       | 41 |
| 1.1.1.4.7 Економічна доцільність застосування SVC                     | 42 |
| 1.1.1.5 Комплексні системи FACTS (STATCOM)                            | 42 |
| 1.1.1.5.1 Загальна характеристика FACTS та роль STATCOM               | 44 |
| 1.1.1.5.2 Принцип роботи STATCOM                                      | 44 |
| 1.1.1.5.3 Переваги STATCOM у порівнянні з традиційними компенсаторами | 45 |
| 1.1.1.5.4 Конструктивні типи STATCOM                                  | 46 |
| 1.1.1.5.5 Застосування STATCOM                                        | 46 |
| 1.1.1.5.6 Особливості керування STATCOM                               | 47 |
| 1.1.1.5.7 Недоліки STATCOM                                            | 47 |
| 1.1.2 Переваги впровадження компенсації                               | 48 |

|       |                                                                                  |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.2   | Схема внутрішньозаводського електропостачання                                    | 48 |
| 1.2.1 | Загальні принципи побудови внутрішньозаводської мережі                           | 49 |
| 1.2.2 | Джерела живлення внутрішньозаводської мережі                                     | 52 |
| 1.2.3 | Основні елементи внутрішньозаводського електропостачання                         | 52 |
| 1.2.4 | Схеми розподілу електроенергії всередині підприємства                            | 54 |
| 1.2.5 | Електроприймачі та їх категорії                                                  | 55 |
| 1.2.6 | Компенсація реактивної потужності у внутрішньозаводській мережі                  | 55 |
| 1.2.7 | Резервування та автоматизація                                                    | 55 |
| 1.2.8 | Вимоги до якості електроенергії                                                  | 55 |
| 1.2.9 | Організація експлуатації та технічне обслуговування                              | 56 |
| 1.3   | Схема зовнішнього електропостачання                                              | 56 |
| 1.3.1 | Призначення та завдання схеми зовнішнього електропостачання                      | 57 |
| 1.3.2 | Джерела живлення та точки приєднання                                             | 57 |
| 1.3.3 | Категорії надійності та резервування електропостачання                           | 58 |
| 1.3.4 | Основні типи схем зовнішнього електропостачання                                  | 58 |
| 1.3.5 | Трансформаторні підстанції у складі зовнішнього електропостачання                | 58 |
| 1.3.6 | Кабельні лінії зовнішнього електропостачання                                     | 59 |
| 1.3.7 | Розрахунки, що виконуються при проектуванні схеми                                | 59 |
| 1.3.8 | Забезпечення надійності і якості електропостачання                               | 60 |
| 1.4   | Постановка задач                                                                 | 60 |
| 2.    | РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ                                                | 62 |
| 2.1   | Об'єкт і методи дослідження                                                      | 62 |
| 2.2   | Визначення розрахункового електричного навантаження цеху по ремонту електровозів | 65 |
| 2.3   | Визначення розрахункового навантаження підприємства в цілому                     | 70 |
| 2.4   | Картограма та визначення ЦЕН                                                     | 71 |
| 2.5   | Вибір числа і потужності трансформаторів цехових підстанцій                      | 74 |

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.6 КРП на шинах 0,4 кВ ЦТП                                                                                                  | 76  |
| 2.6.1 Розподіл потужності батарей конденсаторів по вузлах навантаження цехової мережі напругою до 1000 В.                    | 78  |
| 2.7 КРП на шинах 10 кВ ГПП                                                                                                   | 81  |
| 2.8 Висновки до розділу                                                                                                      | 81  |
| 3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ                                                                                          | 83  |
| 3.1 Схема зовнішнього електропостачання                                                                                      | 83  |
| 3.2 Схема внутрішньої мережі 10 кВ.                                                                                          | 85  |
| 3.3 Розрахунок струмів КЗ у мережі вище 1000 В                                                                               | 89  |
| 3.4 Вибір високовольного обладнання                                                                                          | 95  |
| 3.5 Розподіл приймачів по пунктах живлення                                                                                   | 99  |
| 3.6 Вибір і перевірка електричних апаратів і струмоведучих частин в електричній мережі до 1000 В                             | 99  |
| 3.7 Вибір перерізів ліній ЕМ живлення цеху.                                                                                  | 103 |
| 3.8 Вибір перерізів розподільчої мережі цеху                                                                                 | 106 |
| 3.9 Розрахунок мережі живлення та розподільчої мережі за умовами допустимої втрати напруги. Побудова епюри відхилень напруги | 106 |
| 3.10 Розрахунок струмів КЗ в мережі до 1 кВ                                                                                  | 106 |
| 3.11 Побудова карти селективності дії електричних апаратів захисту для ділянки ЦМ                                            | 106 |
| 3.12 Висновки до розділу                                                                                                     | 106 |
| 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ                                                                         | 108 |
| 4.1. Розподіл травм за ступенем тяжкості                                                                                     | 108 |
| 4.2 Основні причини виробничих травм та професійних захворювань                                                              | 110 |
| 4.3 Інженерні заходи захисту населення та персоналу об'єктів енергетики. Організація укриття у мирний та воєнний час.        | 111 |
| 4.4 Дія електричного струму на персонал, що експлуатує об'єкти енергетики. Перша допомога при електротравмах                 | 113 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ                                                                                                            | 116 |

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                                                                                       | 10  |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ                                                                                                                      | 119 |
| ДОДАТКИ                                                                                                                               | 1   |
| Додаток А. Розрахунок навантажень цеху по ремонту електровозів                                                                        | 2   |
| Додаток Б. Вибір перерізів розподільчої мережі цеху                                                                                   | 6   |
| Додаток В. Розрахунок мережі живлення та розподільчої мережі за умовами допустимої втрати напруги та побудова епюри відхилень напруги | 9   |
| Додаток Г. Розрахунок струмів КЗ в мережі до 1 кВ                                                                                     | 16  |
| Додаток Д. Побудова карти селективності дії електричних апаратів захисту для ділянки ЦМ                                               | 19  |

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Надійність системи електропостачання є одним із ключових чинників безперебійної роботи підприємства залізничної галузі, особливо виробничих підрозділів, що здійснюють ремонт та технічне обслуговування електровозів. Сучасні локомотивні депо характеризуються високою енергоємністю технологічних процесів, широким використанням електрифікованого обладнання та необхідністю суворого дотримання технологічних циклів ремонту. Будь-які порушення в електропостачанні призводять до зупинки робіт, зриву ремонтних графіків, підвищення аварійності та значних економічних втрат.

Актуальність теми зумовлюється такими основними факторами:

- Зростання електричних навантажень у ремонтних цехах через застосування сучасного діагностичного, підйомно-транспортного та електротехнічного обладнання, що вимагає стабільної та якісної електроенергії.
- Необхідністю підвищення експлуатаційної надійності локомотивного парку, оскільки якість ремонтних робіт безпосередньо залежить від стабільності системи живлення.
- Зношеністю та моральним старінням існуючих електромереж і підстанцій багатьох локомотивних депо, що зумовлює підвищену аварійність та потребує модернізації.
- Вимогами до енергетичної ефективності та безпеки, які постійно підвищуються в умовах сучасних стандартів експлуатації залізничного транспорту.
- Необхідністю впровадження автоматизованих систем контролю і моніторингу, які забезпечують оперативне реагування на відмови, оптимізацію режимів роботи та підвищення надійності електропостачання.

У умовах інтенсивної експлуатації рухомого складу, високої відповідальності ремонтних процесів та необхідності мінімізації простоїв, забезпечення надійності електропостачання ремонтного цеху набуває стратегічного значення. Тому вибрана тема є актуальною, науково та практично значущою, а результати дослідження можна буде використати для модернізації систем електропостачання локомотивних депо, підвищення енергоефективності та надійності роботи залізничної галузі загалом.

**Мета і завдання роботи** Підвищення надійності і ефективності системи електропостачання цеху з ремонту електровозів шляхом аналізу існуючого стану електричних мереж, визначення причин можливих відмов та розробки комплексу технічних і організаційних заходів щодо модернізації та оптимізації режимів роботи системи.

Завдання:

1. Проаналізувати структуру електропостачання локомотивного депо в цілому та цеху по ремонту електровозів зокрема, визначити склад і режими роботи основних електроприймачів;
2. Виконати розрахунок активних, реактивних та повних електричних навантажень цеху по ремонту електровозів і підприємства в цілому з урахуванням коефіцієнтів попиту, одночасності та режимів роботи обладнання;
3. Побудувати картограму електричних навантажень і визначити центр електричних навантажень для обґрунтування раціонального розміщення цехових трансформаторних підстанцій та головної понижаючої підстанції;
4. Обґрунтувати вибір кількості, типу та номінальної потужності трансформаторів цехових підстанцій і ГПП з урахуванням категорій надійності електроприймачів та допустимих коефіцієнтів завантаження;
5. Розробити схему зовнішнього електропостачання підприємства від підстанції енергосистеми напругою 35 кВ із забезпеченням необхідного рівня резервування;
6. Спроекувати внутрішньозаводську мережу напругою 10 кВ, виконати вибір схеми електропостачання та перерізів кабельних ліній за

умовами економічної густини струму, допустимого нагріву та післяаварійних режимів;

7. Виконати розрахунок струмів короткого замикання в мережах напругою вище 1000 В і здійснити перевірку електрообладнання та кабельних ліній на термічну й електродинамічну стійкість;

8. Здійснити вибір комутаційної, захисної та вимірювальної апаратури мереж 10 кВ і 0,4 кВ відповідно до розрахункових параметрів і вимог нормативних документів;

9. Розробити схему компенсації реактивної потужності на шинах 0,4 кВ цехових підстанцій і 10 кВ ГПП з метою підвищення коефіцієнтів потужності та зменшення втрат електроенергії;

10. Виконати розподіл електроприймачів у мережах до 1000 В, здійснити вибір розподільчих пунктів, апаратів захисту та перевірку їх селективності;

11. Провести розрахунок електричних мереж за умовами допустимих втрат напруги, побудувати епюри відхилень напруги та карту селективності дії захистів;

12. Оцінити технічну та економічну ефективність прийнятих проектних рішень і обґрунтувати їх доцільність з позиції надійності, безпеки та енергоефективності системи електропостачання локомотивного депо.

**Об'єкт дослідження** – система електропостачання цеху з ремонту електровозів локомотивного депо.

**Предмет дослідження** – параметри надійності, режими роботи та технічні рішення, що забезпечують безперебійне та якісне електропостачання ремонтного цеху.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Вдосконалено підхід до оцінювання надійності електропостачання ремонтного виробництва шляхом комплексного аналізу режимів навантаження та параметрів якості електроенергії. Запропоновано оптимізовану схему резервування та розподілу

навантаження з урахуванням специфіки роботи ремонтного цеху та характеру технологічних споживачів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Запропоновані технічні рішення можуть бути впроваджені у локомотивних депо для підвищення безперебійності ремонтних процесів, зменшення ймовірності аварій та відмов обладнання. Результати дослідження можна буде використати при плануванні реконструкції й модернізації систем електропостачання інших ремонтних та виробничих підрозділів залізничної галузі.

**Апробація результатів.** Результати за темою кваліфікаційної роботи «Забезпечення надійності системи електропостачання цеху з ремонту електровозів локомотивного депо» були представлені на Міжнародній науково-технічній конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“ присвяченій 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (28-29 травня 2025 року), м. Тернопіль, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

**Структура роботи.** Робота складається з вступу, 4 розділів, загальних висновків, переліку посилань (36 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини - 124 сторінок, 15 таблиць, 19 рисунків.



# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Компенсація реактивної потужності

Компенсація реактивної потужності (КРП) є одним із ключових заходів забезпечення ефективної роботи електричних мереж (ЕМ), підвищення якості та зниження втрат у системі електропостачання. Реактивна потужність, яка виникає переважно внаслідок роботи індуктивних елементів – електродвигунів, трансформаторів, дроселів, зварювальних апаратів тощо, не виконує корисної роботи, однак створює додаткове струмове навантаження у мережі. Це призводить до зростання втрат активної енергії, зниження пропускної здатності обладнання та погіршення на шинах споживачів [1-6].

У більшості промислових та комунальних електричних мереж частка навантаження має індуктивний характер. При низькому коефіцієнті потужності  $\cos\varphi$  збільшується струм, що протікає по лініях та трансформаторах, що, в свою чергу, спричиняє додаткові втрати  $I^2R$ , погіршення теплового режиму обладнання, прискорений знос ізоляції та зниження енергоефективності об'єкту. Тому компенсація реактивної потужності є важливою складовою оптимізації режимів роботи електричної мережі.

Основною метою заходів з компенсації є забезпечення необхідного рівня коефіцієнту потужності, зменшення циркуляції реактивних струмів у мережі та підвищення енергетичної ефективності роботи електроустановок. До основних завдань компенсації належать:

- Зниження сумарних втрат електроенергії в мережевих елементах;
- Покращення показників якості електричної енергії (ПЯЕЕ), зокрема стабілізація напруги;
- Зменшення навантаження трансформаторів і кабельних ліній;
- Підвищення пропускної здатності електричних мереж без необхідності модернізації обладнання;

- Зниження витрат споживача за рахунок уникнення штрафів за низький  $\cos\varphi$ .

Ефективна компенсація реактивної потужності дозволяє покращити техніко-економічні показники роботи системи електропостачання, підвищити надійність і стійкість електричних мереж.

### **1.1.1 Методи компенсації реактивної потужності**

У практиці електропостачання застосовується кілька основних методів компенсації, вибір яких визначається характером навантажень, потужністю об'єкту, технічними вимогами та економічними міркуваннями [6].

#### **1.1.1.1 Статичні конденсаторні установки**

Статичні конденсаторні установки (СКУ) є одним з найбільш поширених та ефективних засобів КРП в ЕМ різних класів напруг. Їх застосування забезпечує суттєве підвищення енергоефективності електроустановок, покращення режимів напруги та зниження навантаження на мережеві елементи. У промислових та комунальних системах електропостачання СКУ залишаються базовим і найекономічнішим засобом підвищення коефіцієнта потужності, оскільки їх конструкція є простою, а робота – надійною та передбачуваною.

На рисунку 1.1 показано статичну високовольтну установку компенсації реактивної потужності, 200 кВАр.

##### **1.1.1.1.1 Загальна характеристика статичних конденсаторних установок**

Статичними конденсаторними установками називають установки, у яких компенсація реактивної потужності здійснюється за допомогою ємнісних елементів – силових конденсаторів. Вони призначені для генерування ємнісної реактивної потужності, що компенсує індуктивну складову навантаження й дозволяє повний струм, який споживається від джерела живлення.

У промислових електромережах індуктивні навантаження становлять 60-90% загального навантаження, тому без компенсації реактивної потужності коефіцієнт потужності часто перебуває в межах 0,6-0,75. За таких значень відбувається суттєве зростання струмів у мережі, що призводить до підвищення втрат електроенергії, погіршення регулювання напруги, прискореного старіння ізоляції та зменшення ресурсу обладнання. Встановлення СКУ дозволяє підвищити  $\cos\phi$  до нормативних 0,95-0,99, що забезпечує зниження втрат і оптимізацію роботи мережі.



Рисунок 1.1 - Статична високовольтна установка компенсації реактивної потужності, 200 кВАр

На рисунку 1.2 показано статичні високовольтні установки компенсації реактивної потужності 100, 200, 400 кВАр.



Рисунок 1.2 - Статичні високовольтні установки компенсації реактивної потужності 100, 200, 400 кВАр.



Рисунок 1.2 - Статичні високовольтні установки компенсації реактивної потужності 100, 200, 400 кВАр (продовження)

#### 1.1.1.1.2 Принцип роботи та математичні основи компенсації

Основним елементом СКУ є конденсатор, ємнісний опір якого визначається виразом:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC},$$

де  $C$  - ємність конденсатора,

$f$  - частота мережі.

Конденсатор забезпечує генерацію реактивної потужності:

$$Q_c = U^2 \cdot 2\pi fC,$$

$U$  - діюче значення напруги.

Підключення СКУ дозволяє зменшити необхідну реактивну потужність від джерела:

$$Q_{\text{зал}} = Q_{\text{нав}} - Q_c,$$

що зменшує повний струм:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = \frac{\sqrt{P^2 + Q_{\text{зал}}^2}}{\sqrt{3}U}.$$

Таким чином, підвищення коефіцієнта потужності за допомогою конденсаторних установок безпосередньо знижує струм навантаження та втрати у мережі, пропорційні квадрату струму.

#### **1.1.1.1.3 Конструктивне виконання СКУ**

Силові конденсатори для СКУ виконуються у вигляді металевих геометричних корпусів, заповнених полімерним діелектриком (поліпропіленом), який має високу стійкість до перенапруг та температурних коливань. У більшості сучасних моделей передбачена система самогенерації, яка дозволяє ізоляції «відновлюватися» після локальних пробоїв.

Типова СКУ включає такі елементи:

- Трифазні або однофазні силові конденсатори;
- Розрядні резистори, що забезпечують зниження напруги до безпечного рівня протягом 60-300 секунд після відключення;
- Захисні апарати: автоматичні вимикачі, плавкі запобіжники, контактори для ступеневого підключення;
- Корпус і система вентиляції, що забезпечує відведення тепла;
- Індикатори стану та засоби моніторингу.

СКУ можуть мати фіксовану потужність або виконувались у вигляді багатоступеневих систем, де кожен ступінь підключається окремим комутаційним апаратом.

#### **1.1.1.1.4 Види статичних конденсаторних установок**

##### **1.1.1.1.4.1 Установки з фіксованою потужністю**

Це найпростіший варіант СКУ, що підключається безпосередньо до шин трансформаторних підстанції або розподільчого щита. Вони забезпечують



постійну компенсацію й використовуються у випадках, коли навантаження змінюється незначно.

Переваги:

- Мінімальна вартість;
- Висока надійність;
- Проста конструкція.

Недоліки:

- Неможливість швидкого регулювання реактивної потужності;
- Ризик перекомпенсації, що може призвести до підвищення напруги.

#### **1.1.1.1.4.2 Ступінчасті СКУ з автоматичним регулюванням**

Складаються з кількох груп конденсаторів (ступенів), які підключаються за командою контролера  $\cos\phi$ . Кожна група може мати різну потужність, що дозволяє точно регулювати величину компенсації.

Переваги:

- Автоматичне підтримання  $\cos\phi$ ;
- Адаптація до змін навантаження;
- Можливість оптимізації режимів роботи трансформатора.

Це найбільш розповсюджений тип СКУ на підприємствах і підстанціях 0,4-10 кВ.

#### **1.1.1.1.4.3 Антигармонічні СКУ**

У містах та промислових зонах часто присутні гармонічні вкладки струму, які можуть призводити до резонансних явищ у конденсаторних установках. Для уникнення цього застосовують реактори детюнінгу, які зміщують резонансну частоту нижче основної гармоніки.

Переваги:

- Захист від теплового перевантаження конденсаторів;
- Зниження впливу вищих гармонік;
- Підвищення ресурсу СКУ.

Такі системи рекомендується використовувати в мережах із суттєвими нелінійними навантаженнями (частотні перетворювачі, тиристорні приводи, комп'ютерні центри).

#### **1.1.1.1.5 Переваги впровадження СКУ**

Установлення статичних конденсаторних установок забезпечує значний техніко-економічний ефект:

- Підвищення коефіцієнта потужності до 0,95-0,99. Це знижує реактивний струм і втрати електроенергії.
- Зниження навантаження трансформаторів на 10-25%, що продовжує строк їх служби.
- Покращення якості електричної енергії, зокрема стабілізація напруги на шинах споживачів.
- Підвищення пропускної здатності мережі без реконструкції, що особливо важливо для підстанцій, близьких до граничного навантаження.
- Зниження втрат підприємства, оскільки включаються штрафи за низький  $\cos\varphi$ .
- Мінімальні експлуатаційні витрати, оскільки СКУ не потребують частого обслуговування та мають великий ресурс роботи (10-15 років).

#### **1.1.1.1.6 Недоліки та особливості застосування**

Попри значні переваги, СКУ мають і певні недоліки:

- Відсутність плавного регулювання реактивної потужності (у простих моделях);
- Можливість виникнення перенапруг при відключенні та підключенні;
- Чутливість до гармонічних спотворень;
- Необхідність встановлення апаратів захисту та контролю температури.



У мережах з високим рівнем гармонік рекомендується застосовувати виключно СКУ з реакторами детюнінгу, що забезпечує електромагнітну сумісність і захист конденсаторів.

#### **1.1.1.1.7 Галузі застосування**

Статичні конденсаторні установки широко застосовуються:

- У промислових електромережах для компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів;
- У системах освітлення;
- На трансформаторних підстанціях 0,4-10 кВ;
- У мережах побутових і комерційних споживачів;
- У системах електропостачання з обмеженими можливостями модернізації.

СКУ особливо ефективні у випадках, коли навантаження має сталий або передбачуваний характер, а також у місцях, де важливо знизити втрати електроенергії та забезпечити допустимий рівень напруги.

Таким чином, статичні конденсаторні установки є базовими та економічно обґрунтованими засобами компенсації реактивної потужності в електричних мережах напругою 0,4-10 кВ. Їх застосування забезпечує суттєве підвищення коефіцієнта потужності, зниження струмового навантаження на трансформатори і кабельні лінії, а також зменшення втрат активної енергії в розподільчих мережах. Принцип роботи СКУ ґрунтується на генерації ємнісної реактивної потужності, яка компенсує індуктивну складову навантаження та оптимізує режими електропостачання.

Розглянуті конструктивні особливості, різновиди та методи застосування СКУ свідчать про їхню високу надійність, простоту експлуатації та тривалий термін служби. Установки з автоматичним регулюванням та антигармонічним захистом дають змогу гнучко адаптувати систему компенсації до змін

навантаження та забезпечити електромагнітну сумісність у мережах із підвищеним рівнем нелінійних спотворень.

Економічна доцільність впровадження статичних конденсаторних установок полягає у можливості скорочення витрат на оплату реактивної енергії, збільшення пропускної здатності мережі без капітальних вкладень у її реконструкцію та підвищення ресурсу основного електротехнічного обладнання. В сукупності це робить SKU одним з найефективніших та найпоширеніших рішень для оптимізації режимів роботи систем електропостачання різного призначення.

#### **1.1.1.2 Автоматизовані конденсаторні установки**

Автоматизовані конденсаторні установки (АКУ) є сучасним та ефективним засобом компенсації реактивної потужності у промислових та комунальних електричних мережах. Їх застосування дозволяє забезпечити підтримання необхідного рівня коефіцієнта потужності  $\cos\phi$  в реальному часі, зменшити втрати електроенергії у лініях, підвищити пропускну здатність трансформаторів, а також уникнути штрафних санкцій енергопостачальних компаній за перевищення допустимого споживання реактивної енергії. На відміну від статичних конденсаторних батарей, де вмикання та вимикання ступенів виконується оператором або на фіксованих умовах, автоматизовані установки працюють у повністю автоматичному режимі та адаптуються до поточного навантаження електромережі.

На рисунку 1.3 показано автоматичний високовольтний пристрій компенсації реактивної потужності 3000 кВАр, 6 кВ, з дома секціями по 1500 кВАр на базі конденсаторів CIRCUTOR (Іспанія), контакторів Hyundai (Корея), запобіжників ETI (Словенія), регулятора KBR (Німеччина).



Рисунок 1.3 - Автоматичний високовольтний пристрій компенсації реактивної потужності 3000 кВАр, 6 кВ, з дома секціями по 1500 кВАр на базі конденсаторів CIRCUTOR (Іспанія), контакторів Hyundai (Корея), запобіжників ЕТІ (Словенія), регулятора KBR (Німеччина)

На рисунку 1.4 показано автоматичний високовольтний пристрій компенсації реактивної потужності 1275 кВАр на базі конденсаторів RTR (Іспанія), 6 кВ, регульований, 3 ступені, щит включає ввідну комірку з вимикачем навантаження.



Рисунок 1.4 - Автоматичний високовольтний пристрій компенсації реактивної потужності 1275 кВАр на базі конденсаторів RTR (Іспанія), 6 кВ, регульований, 3 ступені, щит включає ввідну комірку з вимикачем навантаження.

На рисунку 1.5 показано два пристрої КРП на ПС 110/6 кВ.



Рисунок 1.5 - Два пристрої КРП на ПС 110/6 кВ.

На рисунку 1.6 показано лабораторний стенд для компенсації реактивної потужності на кафедрі Електричної інженерії ТНТУ [2].



Рисунок 1.6 – Лабораторний стенд для компенсації реактивної потужності на кафедрі Електричної інженерії ТНТУ.



### 1.1.1.2.1 Призначення та область застосування АКУ

Основним завданням автоматизованих конденсаторних установок є динамічне регулювання балансу реактивної потужності в електричній мережі підприємства. Такі установки застосовуються у випадках, коли характер навантаження змінюється в широкому діапазоні, а саме:

- На підприємствах з великою кількістю асинхронних електродвигунів;
- У системах з частими пусками та зупинками двигунів;
- У мережах, де застосовуються зварювальні апарати, компресори, насоси;
- У комерційних об'єктах із змінним навантаженням (торгові центри, офіси, бізнес-центри);
- У системах електропостачання житлових комплексів, де навантаження суттєво відрізняється протягом доби;
- На об'єктах з нелінійними споживачами (частотні перетворювачі, тиристорні установки).

Автоматизована компенсація дозволяє забезпечувати підтримання  $\cos\phi$  на рівні 0,95-0,99, незалежно від миттєвих змін навантаження, що особливо важливо у мережах із нестабільним графіком роботи.

### 1.1.1.2.2 Структура та принцип роботи автоматизованих установок

Типова АКУ складається з таких основних елементів:

- Реактивних елементів (конденсаторів) – формують необхідну ємнісну потужність;
- Комутаційних апаратів – контактні або тиристорні комутаційні члени для перемикання ступенів;
- Реле реактивної потужності (контролера  $\cos\phi$ ) – «мозок» системи, який аналізує параметри мережі;
- Запобіжних елементів та захисту – автоматичні вимикачі, плавкі вставки, термодатчики;

- Дроселів (при необхідності) – для зниження впливу гармонік та резонансних явищ;
- Системи вентиляції та контролю температури;
- Шафи керування та силового розподілу.

Принцип роботи АКУ полягає у вимірюванні поточного  $\cos\varphi$  та величини реактивної потужності навантаження. Контролер у реальному часі аналізує:

- Активну та реактивну складові струму;
- Величину навантаження;
- Рівень спотворень мережі;
- Напрямок потоку реактивної енергії.

На основі отриманої інформації реле  $\cos\varphi$  автоматично підключає або відключає певні ступені конденсаторних батарей, забезпечує оптимальне значення коефіцієнта потужності.

#### **1.1.1.2.3 Типи автоматизованих конденсаторних установок**

АКУ поділяються за типом комутації на:

- установки з контакторною комутацією;
- тиристорні (реактори швидкого вмикання);
- АКУ із реакторним захистом (антигармонічні установки).

##### **1.1.1.2.3.1 Установки з контакторною комутацією**

Вони є більш поширеним та економічно вигідним варіантом.

Переваги:

- Низька вартість;
- Простота обслуговування;
- Надійність та доступність комплектуючих.

Недоліки:

- Наявність перехідних процесів при вмиканні;
- Шум комутації;
- Обмежена швидкість перемикавання (1-2 секунди).

Такі установки доцільні для мереж із відносно повільно змінним навантаженням.

#### **1.1.1.2.3.2 Тиристорні (реактори швидкого вмикання)**

Комутація здійснюється за допомогою тиристорних модулів, що дозволяє вмикати та вимикати ступені за 20-40 мс, без переходу через нуль і без стрибків струму.

Переваги:

- Миттєва реакція на зміну навантаження;
- Відсутність вищих гармонік у момент комутації;
- Практично безшумна робота;
- Можливість роботи з динамічними споживачами.

Недоліки:

- Висока вартість обладнання;
- Підвищені вимоги до тепловідведення.

Такі установки застосовуються на підприємствах зі швидко змінними та імпульсними навантаженнями (крани, підйомники, зварювальні апарати, ліфти, компресорні станції).

#### **1.1.1.2.3.3 АКУ із реакторним захистом (антигармонічні установки)**

Вони обладнані дроселями, які підключаються послідовно з конденсаторами з метою:

- Зниження вищих гармонік;
- Уникнення резонансу;
- Стабілізації роботи при нелінійному навантаженні.

Такі установки застосовуються в мережах із великою кількістю частотних перетворювачів, ІБП, тиристорних силових установок.



#### **1.1.1.2.4 Переваги застосування АКУ**

Автоматизовані конденсаторні установки забезпечують низку важливим технічних та економічних переваг:

- Суттєве підвищення  $\cos\phi$  у режимі реального часу;
- Зменшення струмового навантаження на трансформатори та кабельні лінії;
- Підвищення пропускної здатності мережі без додаткових капітальних витрат;
- Зниження втрат електроенергії (до 10-15% на окремих ділянках);
- Стабілізація напруги на шинах розподільчих пристроїв;
- Зниження навантаження на реактивну енергію, що дозволяє уникнути штрафів;
- Автоматична адаптація до змін навантаження, виключення «людського фактору»;
- Підвищення енергоефективності електропостачання.

#### **1.1.1.2.5 Умови вибору та проектування АКУ**

Під час вибору та проектування автоматизованої конденсаторної установки враховують такі фактори:

- Потужність реактивного навантаження підприємства та графік її зміни;
- Тип споживачів (лінійні, нелінійні, динамічні);
- Рівень гармонічних спотворень THD у мережі;
- Необхідну швидкість реакції системи;
- Умови встановлення (температура, вентиляція, запиленість);
- Можливість подальшого розширення та модернізації;
- Сумісність з існуючим обладнанням РП, щитами КТП;
- Економічну доцільність – строк окупності АКУ зазвичай становить 1-3 роки.

#### **1.1.1.2.6 Особливості експлуатації та обслуговування**

Для забезпечення тривалої та безаварійної роботи АКУ необхідно:

- Регулярно контролювати температуру всередині шафи;
- Проводити перевірку контактів комутаційних апаратів;
- Контролювати ємність конденсаторів та рівень їх деградації;
- Перевіряти стан плавких запобіжників та автоматичних вимикачів;
- Здійснювати очистку системи вентиляції;
- Контролювати параметри мережі, особливо у випадку нелінійних навантажень.

Наявність автоматичної діагностики та диспетчеризації дозволяє значно спростити обслуговування та підвищити надійність.

Автоматизовані конденсаторні установки є одним із ключових елементів сучасних систем КРП. Вони забезпечують стабільну роботу електричних мереж у реальному часі, дають змогу суттєво підвищити енергоефективність, знизити витрати та оптимізувати роботу трансформаторів і кабельних ліній. Завдяки здатності швидко реагувати на зміну навантаження АКУ широко застосовування у промисловості, комунальній сфері та на об'єктах з високою часткою динамічних і нелінійних споживачів. Використання автоматизованих систем компенсації є економічно обґрунтованим рішенням, що дозволяє підприємствам зменшити витрати на електроенергію та підвищити надійність електропостачання.

#### **1.1.1.3 Тиристорні компенсатори реактивної потужності (TSC/TCR)**

Належать до класу статичних компенсувальних пристроїв, що забезпечують динамічне та високоточне регулювання реактивної потужності в електричних мережах. На відміну від традиційних конденсаторних батарей, де регулювання відбувається дискретно за допомогою контакторів, тиристорні компенсатори дозволяють здійснювати швидке, безконтактне, плавне та практично безударне керування рівнем реактивної потужності. Завдяки цьому

вони значно підвищують якість напруги, стабільність параметрів мережі та енергоефективність електропостачання об'єктів з динамічним навантаженням.

#### **1.1.1.3.1 Призначення та область застосування TSC/TCR**

TSC/TCR-засоби застосовують у випадках, коли необхідне високошвидкісне регулювання реактивної потужності. Це стосується:

- Електроприводів змінної швидкості (крани, підйомники, екскаватори);
- Систем транспортування та конвеєрних ліній;
- Компресорних і насосних станцій;
- Печей індуктивного нагрівання та дугових сталеплавильних печей;
- Підприємств машинобудування, металургії та переробної промисловості;
- Об'єктів з великою кількістю частотних перетворювачів;
- Мереж з високим рівнем гармонік, де контактна комутація небажана.

Основна особливість застосування TSC/TCR полягає у здатності реагувати на зміну навантаження протягом десятих або навіть сотих часток секунди, що робить їх незамінними у мережах з імпульсними або різко змінними режимами роботи.

#### **1.1.1.3.2 Структура та принцип роботи тиристорних компенсаторів**

Комплекс TSC/TCR має комбіновану структуру та складається з:

- TSC-модулів (тиристорно-комутованих конденсаторів) – забезпечують швидке дискретне вмикання конденсаторних ступенів у момент проходження струму через нуль;
- TCR-модуля (тиристорно-керованого реактора) – дозволяє плавно регулювати реактивну потужність шляхом зміни кута керування тиристорів;
- Тиристорних модулів (двохнаправлених тиристорних ключів) – виконують безконтактну комутацію;

- Фільтрів високих гармонік – запобігають виникненню небажаних спотворень форми струму;
- Реле контролю  $\cos\phi$  або цифрового контролера STATCOM-класу – аналізує параметр мережі в реальному часі;
- Системи захисту та тепловідведення, включаючи датчик температури та електронні запобіжники.

Принцип роботи.

- TSC-модулі вмикаються у момент переходу напруги через нуль – це забезпечує відсутність кидків струму;
- TCR-модуль працює у режимі зміни кута відкривання тиристорів (фазоімпульсне керування), що дозволяє плавно змінювати індуктивну реактивну потужність;
- Спільна робота цих модулів дає змогу компенсатору створювати як ємнісну, так і індуктивну реактивну потужність у широкому діапазоні.

Таким чином, TSC забезпечує швидкоперемикну компенсацію, а TCR – плавне вирівнювання режиму.

#### **1.1.1.3.3 Переваги TSC/ TCR у порівнянні з традиційними АКУ**

Тиристорні компенсатори мають ряд важливих переваг:

- Висока швидкість реакції. TSC-модулі вмикають за півперіоду мережі ( $\approx 10$  мс), а TCR дозволяє регулювати потужність практично миттєво. Це критично важливо для підприємств з імпульсним навантаженням.
- Відсутність перехідних процесів. Тиристорна комутація відбувається без механічних контактів, що забезпечує: відсутність дуги, мінімальні електродинамічні удари, великий ресурс роботи (десятки мільйонів циклів).
- Плавне регулювання потужності. TCR-модуль може змінювати реактивну потужність від 0 до максимального значення плавно, без стрибків та переривань.

- Висока точність підтримання  $\cos\phi$ . Цифровий контролер дозволяє підтримувати  $\cos\phi$  в межах  $\pm 0,01$ , що недоступно для контактних АКУ;
- Підвищена надійність. Відсутність механічних вузлів зменшує потребу в обслуговуванні.

#### **1.1.1.3.4 Взаємодія TSC/TCR з мережами, що містять гармоніки**

У промислових електричних мережах часто присутні гармонічні складові, зумовлені роботою: виправлячів, частотних перетворювачів, тиристорних приводів, ІБП та серверного обладнання.

TCR, працюючи у режимі фазоімпульсного керування, сам може генерувати гармоніки. Тому, у складі TSC/TCR завжди застосовують: L-фільтри, LC-фільтри, резонансні фільтрокомпенсувальні канали.

Це дозволяє обмежити рівень THD до нормативної величини, встановленої стандартами IEC 61000-3-2 [16] та EN 50160 [14].

На великих підприємствах використовують активні фільтри гармонік, що працюють паралельно з TSC/TCR.

#### **1.1.1.3.5 Режими роботи тиристорного компенсатора**

TSC/TCR може працювати у різних алгоритмах:

- Режим стабілізації  $\cos\phi$ . Контролер автоматично підтримує задане значення коефіцієнта потужності;
- Режим стабілізації напруги. Активується на підприємствах, чутливих до змін напруги, - система регулює реактивну потужність для стабілізації напруги на шинах;
- Режим антифлікерного захисту. Застосування у мережах з дуговими печами та індукційними установками. Система зменшує провали напруги, викликані різкими змінами навантаження;
- Режим фільтрації гармонік. Фільтрові канали у складі TSC/TCR знижують рівень вищих гармонік у мережі.

### 1.1.1.3.6 Конструктивні типи та класифікація

За конструктивним виконанням тиристорні компенсатори поділяють на:

- Одноступеневі TCR – застосовуються для плавної індуктивної компенсації;
- Багатоступеневі TSC – набір тиристорно-комутованих конденсаторів;
- Комбіновані TSC/TCR – забезпечують найвищу точність і гнучкість;
- Модульні системи STATCOM-LC – сучасні активні гібридні компенсатори.

Більшість підприємств використовують комбіновані TSC/TCR, оскільки вони дозволяють досягти мінімальних втрат і стабільного  $\cos\phi$  в усіх режимах.

### 1.1.1.3.7 Переваги та недоліки TSC/TCR

Основні переваги:

- Миттєва реакція на зміну навантаження;
- Дуже висока точність регулювання;
- Можливість плавної компенсації в широкому діапазоні;
- Відсутність механічного зносу;
- Висока надійність та довгий термін служби;
- Можливість роботи у складних промислових умовах;
- Ефективна компенсація при імпульсних навантаженнях.

Недоліки:

- Висока вартість у порівнянні з традиційними АКУ;
- Потреба у системі фільтрації гармонік;
- Підвищення вимог до систем охолодження;
- Складність технічного обслуговування та діагностики.

Проте у випадках з динамічним навантаженням не існує повноцінної альтернативи TSC/TCR.

### **1.1.1.3.8 Економічна ефективність застосування**

Попри відносно високу вартість, тиристорні компенсатори окупаються за 1-3 роки за рахунок:

- Зниження плати за реактивну енергію;
- Зменшення втрат у мережі;
- Збільшення пропускної здатності трансформаторів;
- Зменшення кількості аварійних режимів;
- Підвищення стабільності технологічного процесу.

На підприємствах зі швидкозмінними навантаженнями TSC/TCR забезпечують найбільший ефект, оскільки традиційні конденсаторні установки просто не встигають реагувати.

Тиристорні компенсатори реактивної потужності TSC/TCR є одним з найбільш ефективних засобів динамічної компенсації в сучасних електричних мережах. Завдяки високій швидкості, безударній комутації, плавному регулюванню та точному контролю параметрів ці системи забезпечують стабільність роботи електрообладнання навіть за умов різкозмінних навантажень. Їх використання дозволяє суттєво підвищити якість електроенергії, зменшити втрати та збільшити надійність системи електропостачання. У промисловості, де навантаження має імпульсний або нелінійний характер, тиристорні компенсатори є технологічно обґрунтованим та економічно ефективним рішенням.

### **1.1.1.4 Статичні ВАР-компенсатори (SVC)**

Статичні ВАР-компенсатори (SVC, Static VAR Compensator) належать до класу силових електронних пристроїв для гнучкого керування режимами електричних мереж шляхом регулювання реактивної потужності. На відміну від традиційних конденсаторних установок та навіть тиристорно-керованих компенсаторів TSC/TCR, SVC забезпечують значно ширший динамічний діапазон, високу швидкість реагування, покращену точність стабілізації

напруги та зменшення концепції FACTS (Flexible AC Transmission Systems), яка передбачає збільшення пропускної здатності електричних мереж без масштабних інфраструктурних реконструкцій.

На рисунку 1.7 показано статичні тиристорні компенсатори СТК (SVC).



Рисунок 1.7 - Статичні тиристорні компенсатори СТК (SVC)

#### **1.1.1.4.1 Призначення та область застосування SVC**

Основна функція SVC – забезпечення динамічного регулювання реактивної потужності через генерування або споживання VAR, що дозволяє стабілізувати напругу, покращувати якість електроенергії та мінімізувати перехідні процеси. SVC застосовуються на:

- Електричних мережах 35-750 кВ, особливо на довгих лініях електропередачі;
- Підстанціях, що живлять потужні промислові підприємства;
- Мережах з великою часткою відновлювальної енергетики (ВЕС, СЕС);



- Електротранспортних системах змінного струму;
- Індустріальних мережах зі швидкозмінними або нелінійними навантаженнями (індукційні печі, дугові сталеплавильні печі, приводи великих агрегатів).

Основним завданнями, що вирішуються за допомогою SVC, є:

- Стабілізація напруги на шинах великої підстанції;
- КРП у режимі реального часу;
- Зниження потужнісних коливань;
- Обмеження перенапруг та підтримання профілю напруги;
- Зменшення флікера (коливань яскравості освітлення);
- Покращення перехідної стійкості електроенергетичних систем.

#### **1.1.1.4.2 Структура та принцип дії SVC**

Класична структура статичного вар-компенсатора включає такі основні функціональні модулі:

- TCR (Thyristor Controlled Reactor) – тиристорно-керований реактор, що дозволяє плавно змінювати індуктивну реактивну потужність шляхом фазового керування.
- TSC – тиристорно-комутовані конденсатори, які забезпечують дискретне вмикання ємнісних елементів без кидків струму.
- FC (Filter Capacitors) – фільтровані конденсаторні батареї, що одночасно виконують функцію генерації вар і придушення гармонік;
- Harmonic Filters – набори L-C фільтрів для компенсації спотворень від тиристорів і зовнішніх нелінійних навантажень.
- Силкові тиристорні модулі – повністю керовані напівпровідникові ключі;
- Система керування та реле контролю параметрів мережі – забезпечують швидкодію та реалізацію алгоритмів регулювання;
- Вимірювальні трансформатори напруги та струму – передають дані до контролера.

Принцип роботи. Робота SVC базується на зміні величини реактивної потужності, що споживається або генерується пристроєм, для підтримання напруги в заданому діапазоні. Контролер постійно аналізує напругу на шинах, ідентифікує її відхилення та формує сигнали керування для тиристорів.

При зниженні напруги SVC генерує ємнісну реактивну потужність (вмикаються TSC).

При надлишку напруги включаються TCR, який споживає реактивну потужність, знижуючи рівень напруги.

Під час імпульсних навантажень SVC працює у режимі швидкого балансування.

За рахунок поєднання плавного регулювання (TCR) і дискретних ступенів (TSC) досягається широкий регулюючий діапазон та висока точність.

#### **1.1.1.4.3 Типи SVC**

Комбіновані SVC (TSC/TCR). Найпоширеніший тип, поєднує можливість точного керування та широкий діапазон регулювання.

SVC на основі фільтр-конденсаторних каналів. Використовуються в мережах із сильними гармонійними спотвореннями, де потрібна додаткова фільтрація.

SVC для промислових навантажень. Спеціалізовані комплекси для дугових печей, приводів та індукційних установок.

SVC для магістральних електромереж. Великі компенсатори (до сотень MVar), що стабілізують напругу на підстанціях і підвищують стійкість ЕЕС.

#### **1.1.1.4.4 Алгоритми регулювання в SVC**

SVC може працювати за кількома основними алгоритмами:

- Стабілізація напруги (Voltage Regulation Mode). Здійснюється цільовий рівень  $U_{set}$ , який підтримується в реальному часі.

- Стабілізація кута навантаження (Power Oscillation Damping). Використовується в розподільчих мережах для приглушення коливань потужності.
- Зменшення флікеру (Flicker Compensation Mode). Особливо актуально для дугових печей та неперіодичних навантажень.
- Обмеження перенапруг. SVC зменшує або «поглинає» реактивну потужність у разі аварійних ситуацій.

#### **1.1.1.4.5 Переваги застосування SVC**

Статичні вар-компенсатори мають такі ключові переваги:

- Висока швидкодія – реакція порядку 10-20 мс;
- Плавне та точне регулювання реактивної потужності;
- Підвищення стабільності напруги та зменшення її коливань;
- Суттєве зменшення флікеру при імпульсних навантаженнях;
- Покращення перехідної стійкості електроенергетичних систем;
- Сумісність із мережами, що містять значні рівні гармонік;
- Збільшення пропускної здатності ЛЕП без реконструкції;
- Зменшення втрат та зниження навантаження на трансформатори.

#### **1.1.1.4.6 Недоліки та обмеження**

Недоліки та обмеження наступні:

- Висока вартість обладнання та монтажу;
- Значні вимоги до площі обслуговування;
- Складність технічного обслуговування;
- Необхідність точного налаштування фільтрів гармонік;
- Підвищені вимоги до якості силової електроніки.

Однак для систем, де важливі динамічні режими та стабільність напруги, ці недоліки є виправданими.

#### **1.1.1.4.7 Економічна доцільність застосування SVC**

Економічний ефект від впровадження SVC включає:

- Зниження втрат електроенергії в мережі;
- Підвищення пропускної здатності ЛЕП без збільшення перерізу проводів;
- Уникнення штрафів за низький  $\cos\phi$ ;
- Зменшення пристроїв обладнання через перенапруги;
- Стабілізацію технологічних процесів на невеликих підприємствах;
- Можливість відкласти або повністю виключити реконструкцію мереж.

Окупність SVC для промислових об'єктів становить 2-4 роки, для енергосистем – 5-7 років.

Статичні вар-компенсатори (SVC) є одним із найефективніших засобів гнучкого регулювання режимів електричних мереж, особливо за умов швидкозмінних навантажень і високих вимог до стабільності напруги. SVC забезпечують динамічну КРП, зменшення коливань напруги, покращення перехідної стійкості та підвищення загальної надійності енергосистеми. Висока швидкодія, точність регулювання та адаптивні алгоритми роблять їх ключовим елементом сучасних електроенергетичних комплексів та важливим компонентом технологій FACTS. Використання SVC дає змогу значно підвищити ефективність та надійність електропостачання як у промислових мережах, так і на магістральних підстанціях.

#### **1.1.1.5 Комплексні системи FACTS (STATCOM)**

Сучасні електроенергетичні системи постійно ускладнюються, а навантаження в мережах стають більш динамічними та нелінійними. У таких умовах традиційні засоби КРП (конденсаторні установки, реактори, контактні регулятори) вже не забезпечують необхідної швидкодії та точності регулювання. Щоб гарантувати стабільність напруги, зменшення втрат, підвищення пропускної здатності ліній і покращення якості електричної енергії,

у мережах напругою від 6 кВ до 750 кВ впроваджуються пристрої гнучких систем передачі електроенергії – FACTS.

Одним із найефективніших представників FACTS являється STATCOM – статичний синхронний компенсатор, який забезпечує найшвидше, точне та двобічне регулювання реактивної потужності та напруги у режимі реального часу.

На рисунку 1.8 показано систему STATCOM.



Рисунок 1.8 – Система STATCOM.



Рисунок 1.8 – Система STATCOM (продовження).

#### **1.1.1.5.1 Загальна характеристика FACTS та роль STATCOM**

Пристрої FACTS - це високотехнологічні системи на базі силовій електроніки, призначені для гнучкого керування параметрами електричних мереж. Вони дозволяють управляти: реактивною потужністю, напругою на шинах, потоками потужності в лініях, коливаннями та перехідними процесами, рівнем гармонічних спотворень.

STATCOM, як ключовий елемент FACTS, виконує роль електронного джерела синусоїдального струму, яке може миттєво генерувати або поглинати реактивну потужність залежно від потреб мережі. На відміну від SVC (TSC/TCR), STATCOM створює реактивний струм активно, а не за рахунок зміни опору або ємності.

#### **1.1.1.5.2 Принцип роботи STATCOM**

STATCOM являє собою перетворювач напруги на базі тиристорів GTO, IGBT або IGCT, який працює за принципом ШІМ-регулювання (PWM). Основні елементи: інвертор напруги / струму (двопівперіодний перетворювач); конденсатор постійної шини DC-link; фільтри ВЧ складових; трансформатор (інколи застосовують безтрансформаторні моделі); цифровий контролер із системою швидкодійного регулювання.

Струм STATCOM визначається співвідношенням між напругою інвертора  $U_{inv}$  та напругою мережі  $U_S$ :

- Якщо  $U_{inv} > U_S \rightarrow$  STATCOM генерує реактивну потужність (ємнісний режим);
- Якщо  $U_{inv} < U_S \rightarrow$  він поглинає реактивну потужність (індуктивний режим).

Завдяки повній відсутності механічних елементів STATCOM забезпечує реакцію менше 2-3 мс, що є рекордом параметром серед усіх систем компенсації реактивної потужності.

#### **1.1.1.5.3 Переваги STATCOM у порівнянні з традиційними компенсаторами**

STATCOM є найбільш прогресивним рішенням серед всіх систем РПК (регулювання реактивної потужності та напруги). Основні переваги:

- Надвисока швидкодія. STATCOM здатний компенсувати реактивну потужність у режимі субциклічного керування (менше  $1/20$  періоду), що дозволяє: гасити флікери напруги; стабілізувати напругу при різких провалах; працювати із системами з різко змінним навантаженням.
- Незалежність реактивного струму від рівня напруги. На відміну від SVC, де під час просідання напруги знижується компенсуючий струм, STATCOM зберігає максимальні характеристики навіть при  $0,8-0,6 \cdot U_{ном}$ . Це критично важливо для: точного регулювання напруги на кінцевих споживачах; стабілізації мережі при аваріях та коротких замиканнях; підтримання роботи технологічного обладнання.
- Генерація та поглинання реактивної потужності в повному діапазоні. STATCOM працює у чотирьох квадрантах, забезпечуючи: ємнісну компенсацію; індуктивну компенсацію; миттєве перемикання між режимами.

- Низький рівень гармонічних спотворень. Завдяки ШІМ-регулюванню STATCOM має  $\text{THD} < 2-3\%$ .
- Компактність і модульність. STATCOM займає у 2-3 рази менше місця, ніж аналогічні SVC;
- Висока надійність. Відсутність контактів і механічної комутації дає ресурс роботи понад 20-30 років.

#### **1.1.1.5.4 Конструктивні типи STATCOM**

Конструктивні типи:

- Модульні багаторівневі інвертори (MMC). Найпоширеніший тип – на основі багаторівневих перетворювачів: мінімальний рівень гармонік; гнучка модульність; можливість нарощування потужності до сотень МВАр.
- Типи за призначенням: аркушеві STATCOM для промисловості (0,4-35 кВ); SVC-Light, використовуваний на підстанціях 110-330 кВ; STATCOM для ВДЕ (вітрові та сонячні електростанції); гібридні системи FACTS: STATCOM + SVC + активні фільтри.

#### **1.1.1.5.5 Застосування STATCOM**

STATCOM встановлюють у таких випадках:

- Мережі з нестабільною напругою та імпульсним навантаженням: дугові сталеплавильні печі, індукційні печі, прокатні стани.
- Мережі з високим рівнем нелінійних спотворень: центри обробки даних, великі серверні комплекси, ІТ-кластери.
- Підтримка напруги при аваріях та провалах особливо у мережах 110-750 кВ.
- Підключення ВДЕ: STATCOM стабілізує напругу та реагує на коливання генерації.
- Збільшення передавальної здатності повітряних та кабельних ліній.



### **1.1.1.5.6 Особливості керування STATCOM**

Система керування STATCOM включає: блок швидкого вимірювання параметрів мережі; регулятори напруги, струму та реактивної потужності; адаптивні алгоритми керування (векторне керування, керування за методами прямої синусоїдальної модуляції, синхронні координати, предиктивне керування).

Сучасні STATCOM можуть працювати в режимах: стабілізації напруги; стабілізації  $\cos\phi$ ; антифлікерного регулювання; активної фільтрації гармонік; зменшення провалів напруги при пуску двигунів; компенсації асиметрії фаз.

### **1.1.1.5.7 Недоліки STATCOM**

Попри значні переваги, STATCOM має певні обмеження: висока вартість (у 3-5 разів вища за SVC); необхідність потужності системи охолодження; складність технічного обслуговування; потреба в кваліфікаційному персоналі.

Проте для критичних об'єктів STATCOM часто є єдино можливим рішенням.

Завдяки використанню силової електроніки та швидкодіючих алгоритмів керування STATCOM забезпечує безперервне двостороннє регулювання, мінімальний рівень гармонік та максимальну швидкодію. У поєднанні з іншими засобами FACTS він здатний суттєво підвищити пропускну здатність ліній, стабільність мережі та якість електроенергії.

Застосування STATCOM є обґрунтованим на об'єктах з високими вимогами до стабільності напруги, у системах з динамічними навантаженнями та на підстанціях, що потребують підвищення надійності та гнучкості режимів роботи. Таким чином, комплексні системи FACTS, зокрема STATCOM, відіграють ключову роль у розвитку сучасних електроенергетичних мереж та підвищення їх енергоефективності.

### **1.1.2 Переваги впровадження компенсації**

Ефект від правильно організованої компенсації реактивної потужності включає [6]:

- Підвищення коефіцієнта потужності до нормативного значення 0,95-0,99;
- Зниження струмового навантаження на мережеві елементи до 20-30%;
- Зменшення втрат електроенергії;
- Стабілізацію напруги на шинах споживачів;
- Продовження строку служби обладнання;
- Зниження експлуатаційних витрат та можливість підключення додаткових споживачів без модернізації мережі.

### **1.2 Схема внутрішньозаводського електропостачання**

Схема внутрішньозаводського електропостачання являє собою комплекс технічних рішень, що забезпечують розподіл електричної енергії від трансформаторних підстанцій підприємств до всіх технологічних споживачів, цехів, дільниць, інженерних систем та допоміжного обладнання. Вона є ключовою складовою системи електропостачання промислового об'єкту, оскільки визначає безперебійність живлення обладнання, рівень електробезпеки, ефективність енергоспоживання і надійність роботи виробничих процесів [6, 7, 8].

Внутрішньозаводська мережа охоплює розподільчі пристрої середньо та низької напруги, кабельні та шинні лінії, комутаційні апарати, щитові агрегати, системи резервування та автоматизації. Її побудова виконується відповідно до вимог нормативних документів (ПУЕ [15], ДБН В.2.5-23 [17], ДСТУ EN 50160 [14]) та специфіки технологічних процесів підприємства.

### 1.2.1 Загальні принципи побудови внутрішньозаводської мережі

При проектуванні внутрішньозаводського електропостачання враховуються такі принципи [9, 10, 11]:

1. Надійність електропостачання відповідно до категорії споживачів
  - I категорія – резервування від двох незалежних джерел, АВР, можливість підключення дизель-генератора та UPS (рисунок 1.9, рисунок 1.10);

#### I категорія без перерви електропостачання і збою технологічного процесу

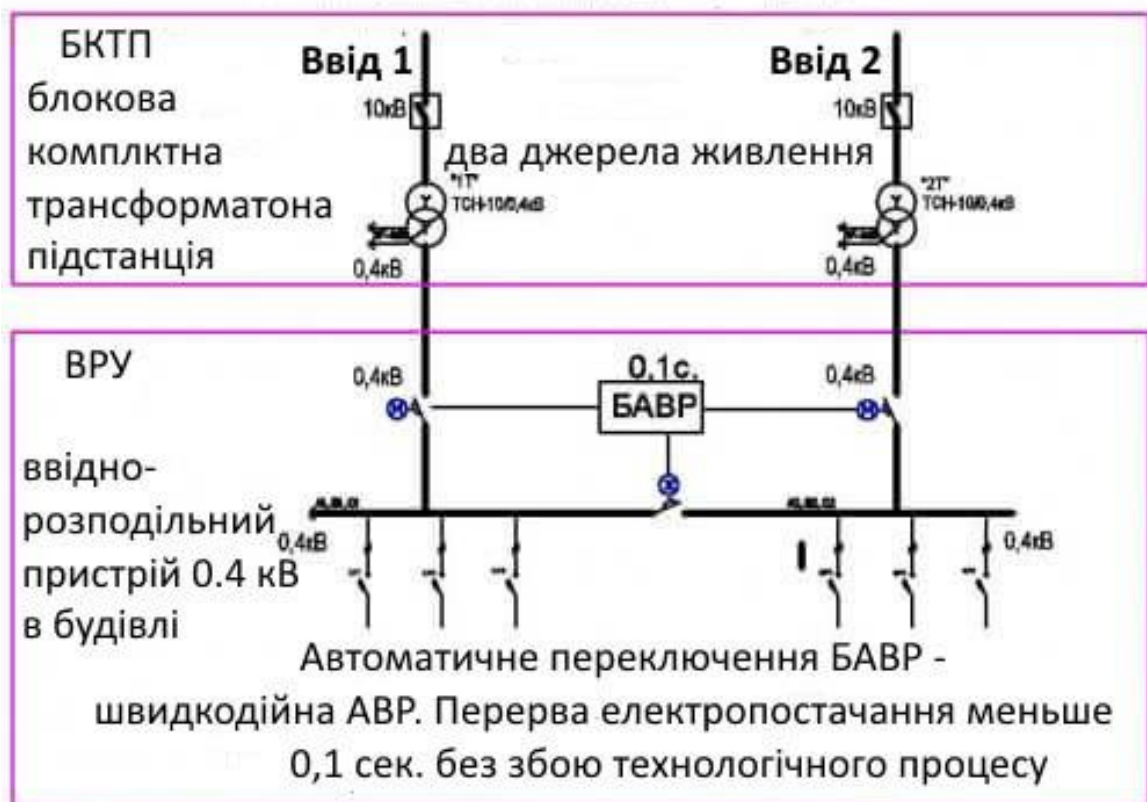


Рисунок 1.9 – I категорія

## I особлива категорія електропостачання

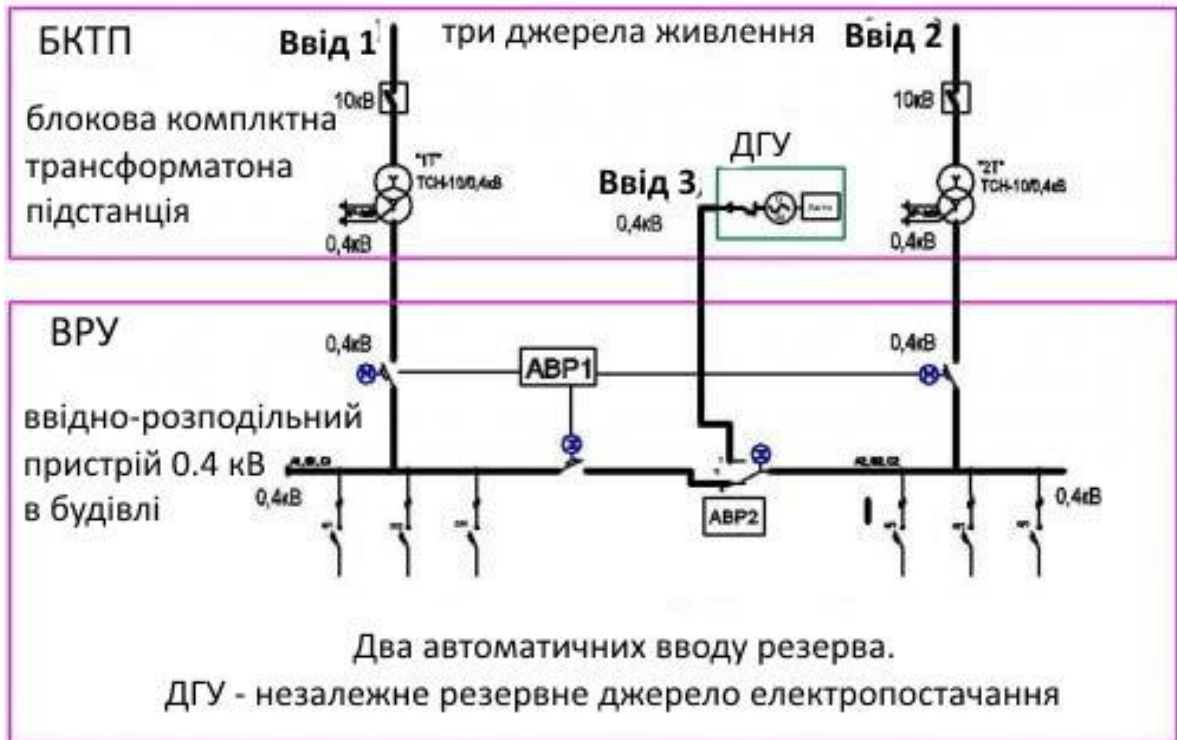


Рисунок 1.10 – I особлива категорія.

- II категорія – резервування на рівні трансформатора або секції (рисунок 1.11);

## II категорія електропостачання

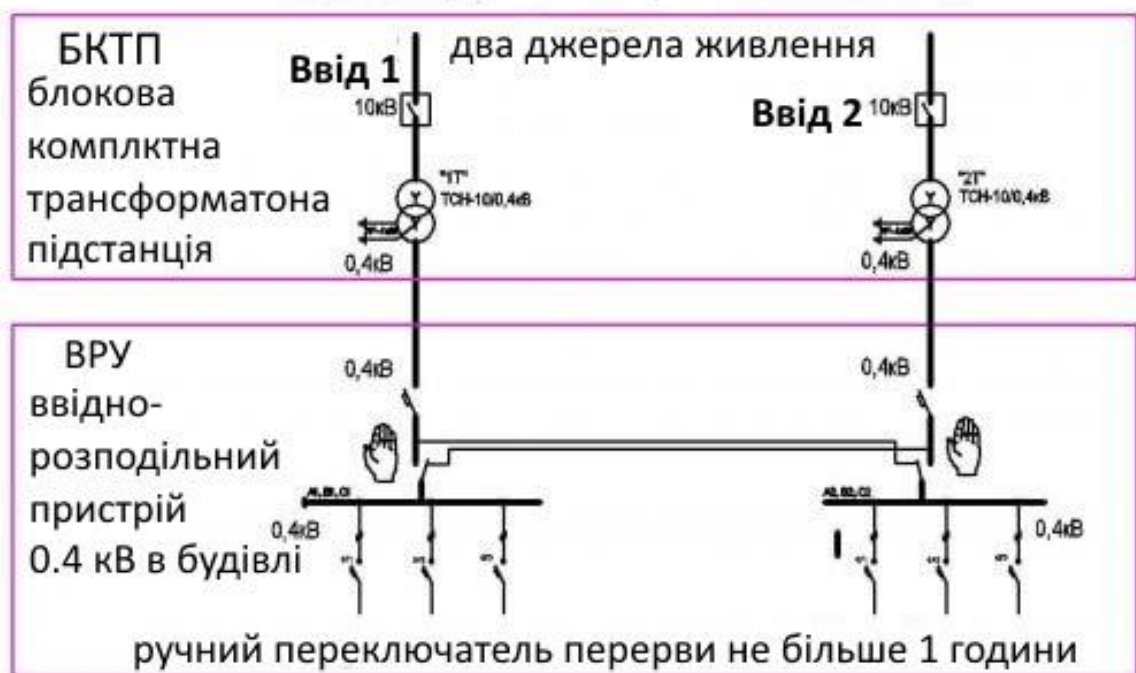


Рисунок 1.11 – II категорія.

- III категорія – допускається односпоживча схема (рисунок 1.12).

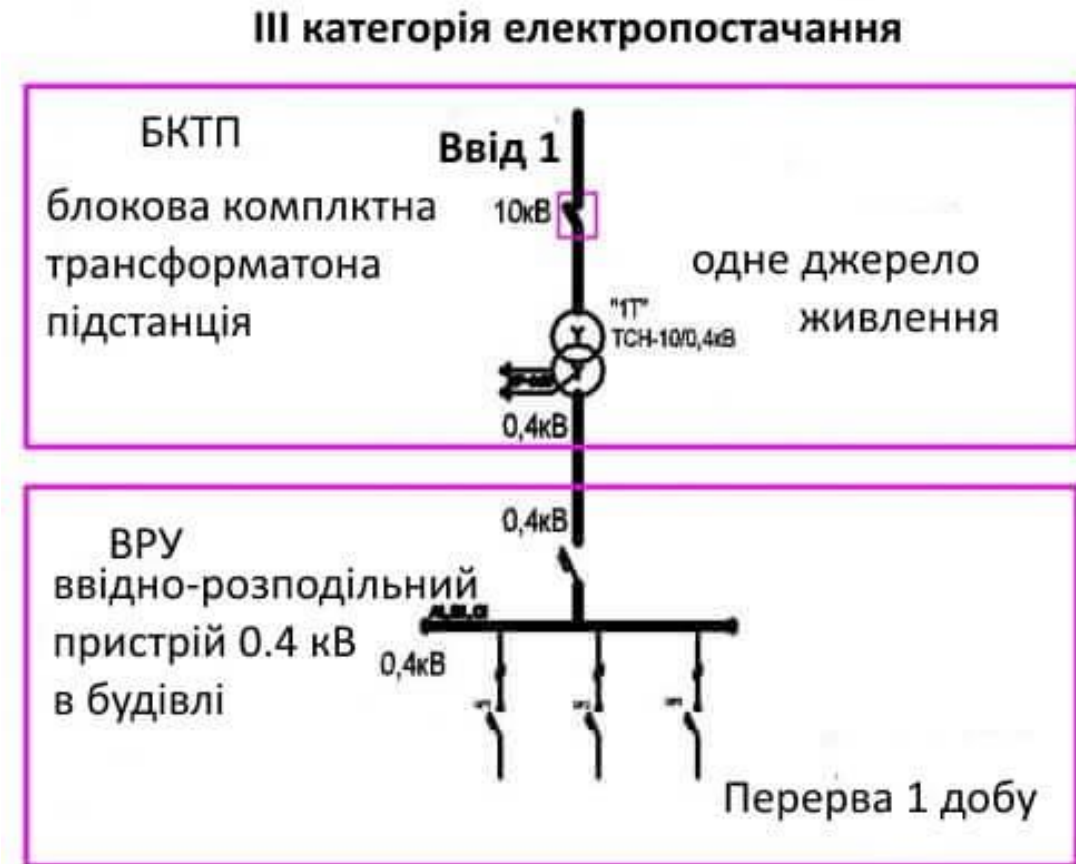


Рисунок 1.12 – III категорія.

2. Мінімізація довжин кабельних трас та втрат напруги. Для енергоємних цехів застосовуються радіальні або магістральні схеми з оптимізованими перерізами кабелів.

3. Селективність захисту. Забезпечує локалізацію аварій без відключення суміжних ділянок мережі.

4. Електробезпека та відповідність умовам експлуатації. Для агресивних середовищ використовуються кабелі з ПВХ або XLPE ізоляцією, у вибухонебезпечних зонах – спецвиконання Ex.

5. Гнучкість та можливість розвитку мережі. Передбачається резерв кабельних лотків, вільні коміртки у РП, можливість встановлення додаткових потужностей.

### 1.2.2 Джерела живлення внутрішньозаводської мережі

Основними джерелами живлення є:

- Трансформаторні підстанції 6/10/35 кВ – 0,4 кВ, що розташовані на території підприємства;
- Центральний розподільчий пункт (ЦРП) середньої напруги;
- Головна понижувальна підстанція (ГПП);
- Релейно-захисні комплекси та АВР;
- Локальні щити 0,4 кВ (ГРЩ, ЩР, ЩП, ВРП).

У великих підприємствах застосовується кільцеве живлення РП, що забезпечує двосторонню подачу напруги для споживачів I категорії.

### 1.2.3 Основні елементи внутрішньозаводського електропостачання

Внутрішньозаводська мережа складається з таких компонентів:

1. Розподільчі пункти середньої напруги (6-10 кВ). Вони призначені для приймання та перерозподілу електроенергії між трансформаторами та цехами підприємства. РП комплектуються КРУ або КРУН у металевих шафах;
2. Трансформаторні підстанції внутрішні та опорні. На великому підприємстві можуть бути: цехові ТП (6/0,4 кВ); комплектні КТП; підстанції типу «ЦТП»; модульні ТП із сухими трансформаторами.
3. Розподільчі мережі низької напруги (0,4 кВ). Це найбільш розгалужена частина системи. Застосовується [9]:
  - Радіальна схема – для потужних споживачів (рисунок 1.13);
  - Магістральна схема – для цехових ділянок (рисунок 1.14);
  - Кільцева схема – для безперебійних технологій (рисунок 1.15).
4. Кабельні та шинні лінії: кабелі з ізоляцією XLPE або ПВХ; шинопроводи для подачі великих струмів у цехах; лотки та коробові системи для монтажу;
5. Щити управління та автоматики. Включають: ГРЩ (головний розподільчий щит); ЩСУ (щити систем управління); шафи

частотних перетворювачів; шафи компенсації реактивної потужності (АКУ, TSC/TCR, STATCOM).

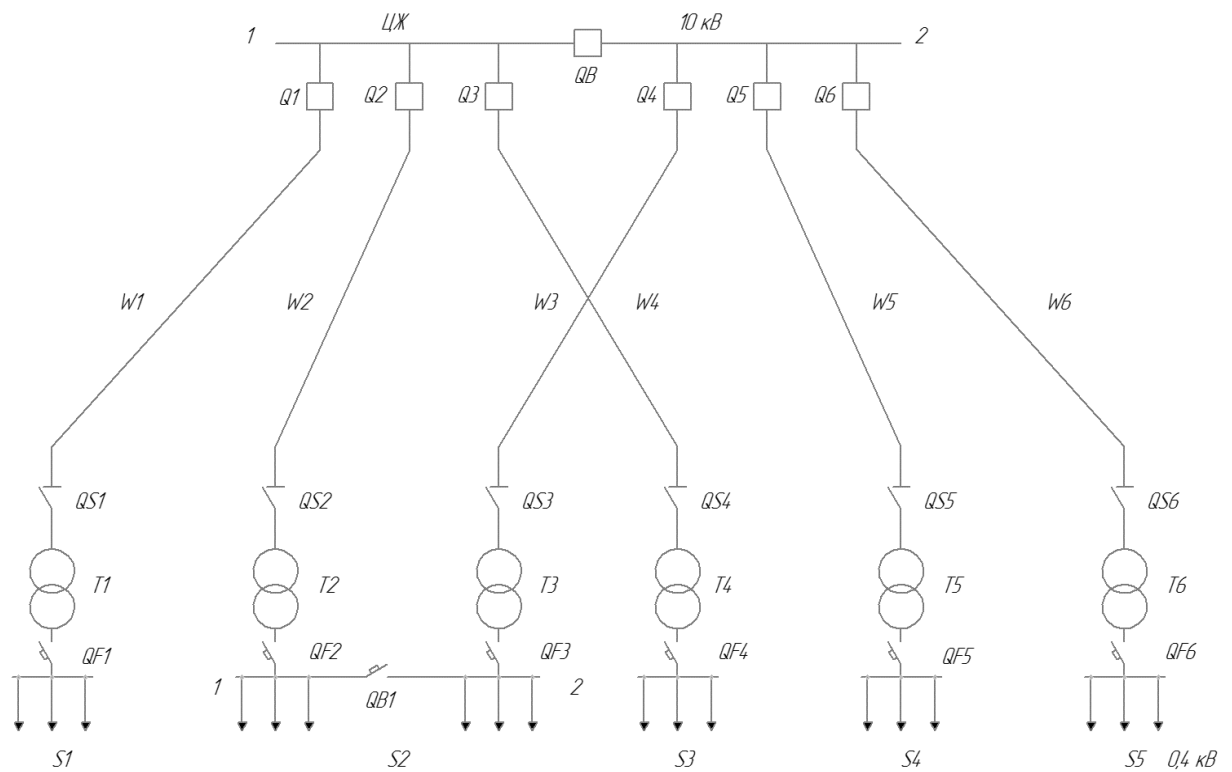


Рисунок 1.13 – Радіальна розподільча мережа

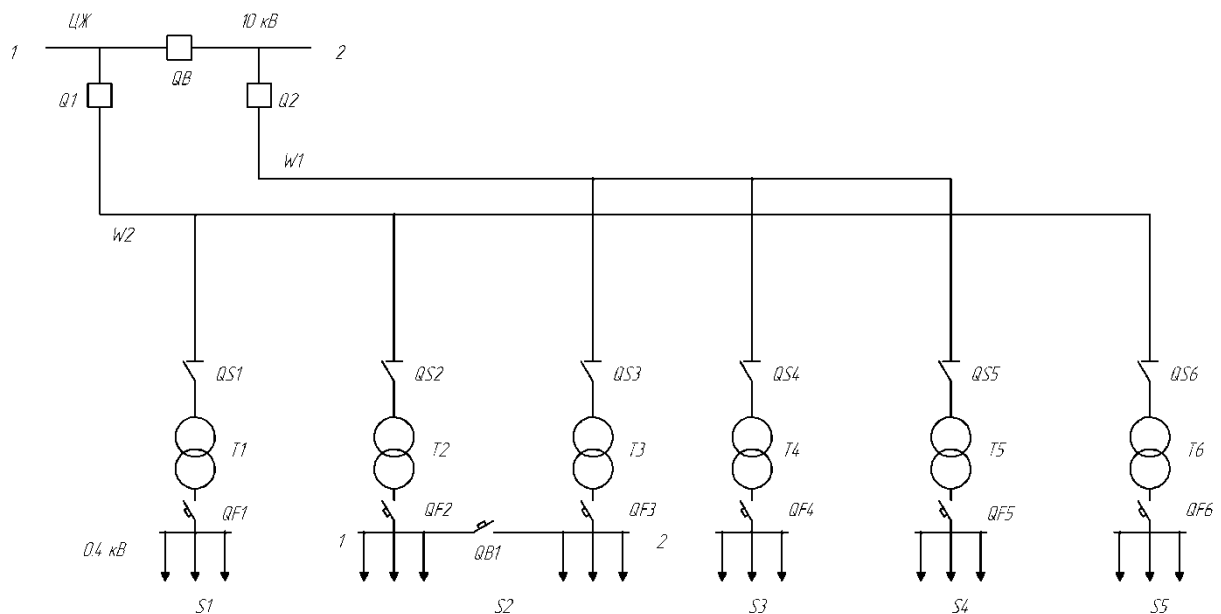


Рисунок 1.14 – Магістральна розподільча мережа

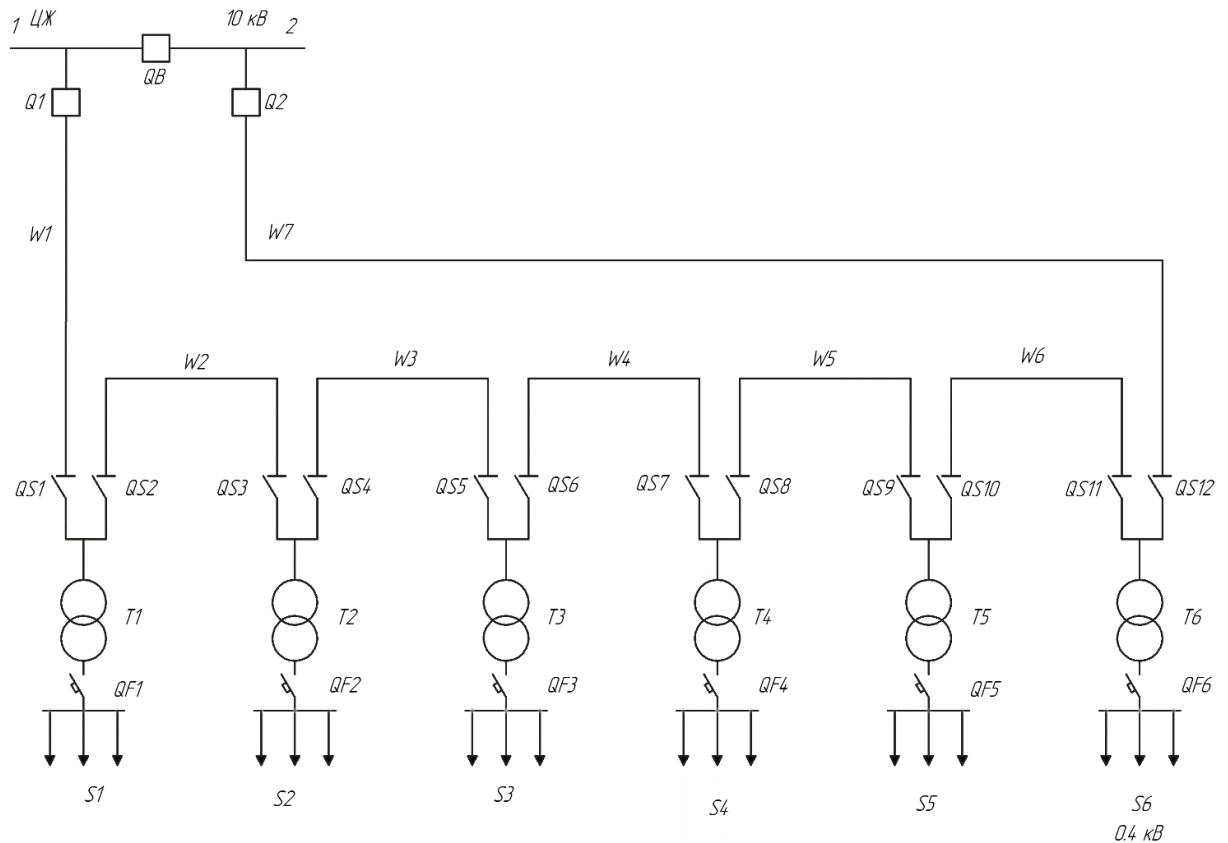


Рисунок 1.15 – Кільцева розподільча мережа.

#### 1.2.4 Схеми розподілу електроенергії всередині підприємства

У промислових об'єктах застосовують такі типові схеми:

1. Радіальна схема [9]. Найнадійніша та найпоширеніша. Кожен потужний споживач живиться окремою лінією від РП або ГРЩ. Переваги: висока селективність; легкість діагностики та локалізації аварії; стабільна напруга.
2. Магістральна схема [9]. Використовується для груп споживачів з невеликою потужністю. Суттєво економить кабель. Переваги: проста реалізація; низька вартість.
3. Кільцева схема [9]. Забезпечує найвищу надійність. Підходить для: хімічних виробництв; металургійних цехів; безперервних технологічних ліній. У разі пошкодження будь-якої ділянки живлення зберігається через іншу гілку кільця.



### **1.2.5 Електроприймачі та їх категорії**

Всі електроприймачі внутрішньозаводської мережі класифікуються на: технологічні (електродвигуни, печі, компресори); освітлювальні; вентиляційні та кліматичні системи; насосні станції; ІТ-обладнання та серверні; системи безпеки та охоронної сигналізації. Категорія електроприймачів впливає на схему резервування та конфігурацію мережі.

### **1.2.6 Компенсація реактивної потужності у внутрішньозаводській мережі**

Для підвищення енергоефективності застосовуються: конденсаторні установки (СКУ); автоматизовані АКУ; тиристорні компенсатори TSC/TCR; STATCOM/FACTS – для мереж з динамічними навантаженнями та високим рівнем гармонік. Системи розміщуються в ГРЩ або цехових ТП [1].

### **1.2.7 Резервування та автоматизація**

Для забезпечення безперебійної роботи внутрішньозаводської мережі використовуються: АВР на секціях 0,4 кВ [12, 13]; дизель-генераторні установки; джерела безперебійного живлення (UPS) – для ІТ і керуючих систем; автоматизовані системи АСКОЕ та SCADA – для моніторингу навантажень і аварійних режимів.

### **1.2.8 Вимоги до якості електроенергії**

Відповідно до ДСТУ EN 50160 [14] внутрішньозаводська мережа повинна забезпечувати: відхилення напруги не більше  $\pm 10\%$ ; симетрію фаз; частоту 50 Гц  $\pm 1\%$ ; обмеження гармонічних спотворень  $\text{THD} \leq 8\%$ ; відсутність провалів напруги та флікеру. У разі наявності нелінійні споживачів встановлюються фільтри гармонік.

### **1.2.9 Організація експлуатації та технічне обслуговування**

Включає: періодичні огляди кабельних ліній, КРУ, ТП, ГРЩ; термографічний контроль контактних з'єднань; вимірювання ізоляції; контроль рівня навантаження трансформаторів; планову ревізію автоматичних вимикачів і захистів; щорічні випробування заземлювальних пристроїв.

Схема внутрішньозаводського електропостачання є складною, багаторівневою структурою, щоб забезпечує безпечний та безперебійний розподіл електроенергії в межах підприємства. Її правильне проектування дозволяє підвищити надійність виробництва, зменшити експлуатаційні витрати, підвищити енергоефективність та забезпечити відповідність нормативним вимогам. Оптимальні мережі, застосування сучасних компенсувальних пристроїв, автоматизація та системи моніторингу формують сучасний підхід до створення енергоефективних внутрішньозаводських систем електропостачання.

### **1.3 Схема зовнішнього електропостачання**

Схема зовнішнього електропостачання є ключовим елементом системи живлення будь-якого промислового підприємства, громадської споруди чи житлового комплексу. Вона визначає спосіб під'єднання об'єкта до електричної мережі, забезпечує надійність і безперебійність електропостачання, а також створює основу для подальшого вибору трансформаторних підстанцій, типів кабельних ліній, апаратури захисту й автоматизації.

Грамотно розроблена схема зовнішнього електропостачання дозволяє досягти оптимального рівня технічної та економічної ефективності, мінімізувати втрати, забезпечити потрібний рівень надійності та відповідності нормам ПУЕ [15], НПАОП, ДБН та стандартам EN/IEC.

### **1.3.1 Призначення та завдання схеми зовнішнього електропостачання**

Схема зовнішнього електропостачання виконує такі основні функції:

- Забезпечення електроенергією об'єкту з необхідними параметрами напруги та частоти;
- Передача потужності від точки приєднання до головного вводу об'єкту;
- Забезпечення надійності та резервування живлення відповідно до категорії електроприймачів;
- Обмеження струмів короткого замикання на рівні допустимих значень;
- Забезпечення можливості обліку, контролю й автоматизації процесів електропостачання.

Основна мета побудови схеми – забезпечити надійне та економічно обґрунтоване живлення, враховуючи перспективи розвитку об'єкта та можливе збільшення електричного навантаження.

### **1.3.2 Джерела живлення та точки приєднання**

Зовнішнє електропостачання об'єктів зазвичай здійснюється від:

1. Повітряних ліній 6-10-35 кВ – для малих і середніх споживачів;
2. Кабельних ліній 10-35 кВ – для об'єктів у міській забудові або при високих вимогах до надійності;
3. Підстанції типу ПС 35/10 кВ, 110/10 кВ чи 110/35/10 кВ – для великих промислових споживачів.
4. Резервних джерел живлення: дизель-генераторні установки (ДГУ); UPS (джерела безперебійного живлення); дизель-роторні агрегати; мікроГЕС, фотоелектричні станції (у сучасних проектах). Точка приєднання визначається оператором системи розподілу (ОРС), який надає технічні умови згідно з потужністю та категорією електроприймачів.

### **1.3.3 Категорії надійності та резервування електропостачання**

Відповідно до ПУЕ [15] електроприймачі поділяють на три категорії:

1. I категорія [9]. Необхідність подвійного незалежного джерела живлення та резерв на ДГУ. Приклади: лікарні, серверні центри, системи безпеки, промислові технології, що не допускають зупинки;
2. II категорія [9]. Достатньо резервування за допомогою перемикачів на інше джерело протягом 1 хвилини. Приклади: житлові комплекси, торгові центри;
3. III категорія [9]. Дозволяється перерва на час відновлення живлення. Приклади: допоміжні та побутові потреби.

Категорія надійності визначає кількість введів, тип схеми, резервне живлення та апаратуру автоматичного вводу резерву (АВР).

### **1.3.4 Основні типи схем зовнішнього електропостачання**

1. Радіальна схема [9]. Найпростіша: один флікер від підстанції – одна підстанція споживача. Переваги: проста експлуатація, невисока вартість. Недоліками є: низька надійність (підходить тільки для III категорії).

2. Кільцева схема [9]. Два фідери з різних напрямків, кільце розмикається на одній із підстанцій. Переваги: висока надійність. Недоліки: складність захисту.

3. Двостороннє живлення (дві незалежні підстанції). Забезпечує найвищий рівень надійності для I категорії.

4. Схема з шинним резервуванням. Два вводи на РП (розподільчий пункт) з АВР.

5. Комбіновані схеми. Поєднують елементи кільцевої та радіальної, застосовуються у великих промислових районах.

### **1.3.5 Трансформаторні підстанції у складі зовнішнього електропостачання**

До складу схеми входять ТП різних типів:

- КТП (комплектні трансформаторні підстанції) – 6/0,4; 10/0,4 кВ;
- РП та ПС середньої напруги – 35/10, 110/10, 110/35/10 кВ;
- Блочно-модульні ТП – для швидкого монтажу на будівельних майданчиках;
- Закриті ТП у будівлях – для офісних, торгових та адміністративних об'єктів.

Трансформаторам надається резервування N+1, а для I категорії застосовують АВР між секціями шин 0,4 кВ.

### **1.3.6 Кабельні лінії зовнішнього електропостачання**

Для зовнішніх мереж використовують:

- Кабелі 6-10 кВ з ізоляцією XLPE (ПвЕП, ПвВГ, АПвВГ);
- Кабелі 0,4 кВ (ВВГнг, АВБбШв, НАУУ);
- Броньовані кабелі у ґрунті;
- Прокладка у ПНД-трубах або лотках;
- Перетини проводів згідно з розрахунком за: допустимим струмом; економічною щільністю струму; струмом КЗ; умовами втрат напруги.

Приймаються заходи до захисту кабельних ліній від механічних пошкоджень та корозії.

### **1.3.7 Розрахунки, що виконуються при проектуванні схеми**

Для обґрунтування схеми розраховують:

1. Розрахункове електричне навантаження об'єкту;
2. Вибір точки приєднання та рівня напруги;
3. Струми короткого замикання для всіх ділянок;
4. Вибір кабелів за номінальним струмом і термостійкістю;
5. Перевірка втрат напруги від підстанції до головного вводу;
6. Вибір апаратів захисту (вимикачів, роз'єднувачів, запобіжників);
7. Розрахунок заземлення та захисних заходів;
8. Електромагнітна сумісність та компенсація реактивної потужності.

### **1.3.8 Забезпечення надійності і якості електропостачання**

Схема зовнішнього електропостачання повинна гарантувати відповідність: рівню напруги  $\pm 10\%$  (EN 50160); нормам по якості електроенергії (THD < 8%); часу відновлення живлення відповідно до категорії; вимогам пожежної безпеки та електричної безпеки.

Для цього застосовують: АВР, селективні релейні захисти; системи компенсації реактивної потужності; обмежувачі перенапруг; моніторинг навантажень (SCADA, АСКОЕ).

Схема зовнішнього електропостачання є фундаментальною частиною системи електроживлення об'єкту, що визначає його надійність, економічність та якість електроенергії. Коректний вибір точки підключення, рівня напруги, типу резервування та структури мережі забезпечує відповідність вимогам ПУЕ [15] і гарантує стабільну роботу електроприймачів усіх категорій. Схема дозволяє знизити втрати, уникнути перевантажень, забезпечити можливість майбутнього розширення та підвищити ресурс електрообладнання.

### **1.4 Постановка завдань**

1. Проаналізувати структуру електропостачання локомотивного депо в цілому та цеху по ремонту електровозів зокрема, визначити склад і режими роботи основних електроприймачів;
2. Виконати розрахунок активних, реактивних та повних електричних навантажень цеху по ремонту електровозів і підприємства в цілому з урахуванням коефіцієнтів попиту, одночасності та режимів роботи обладнання;
3. Побудувати картограму електричних навантажень і визначити центр електричних навантажень для обґрунтування раціонального розміщення цехових трансформаторних підстанцій та головної понижаючої підстанції;

4. Обґрунтувати вибір кількості, типу та номінальної потужності трансформаторів цехових підстанцій і ГПП з урахуванням категорій надійності електроприймачів та допустимих коефіцієнтів завантаження;
5. Розробити схему зовнішнього електропостачання підприємства від підстанції енергосистеми напругою 35 кВ із забезпеченням необхідного рівня резервування;
6. Спроекувати внутрішньозаводську мережу напругою 10 кВ, виконати вибір схеми електропостачання та перерізів кабельних ліній за умовами економічної густини струму, допустимого нагріву та післяаварійних режимів;
7. Виконати розрахунок струмів короткого замикання в мережах напругою вище 1000 В і здійснити перевірку електрообладнання та кабельних ліній на термічну й електродинамічну стійкість;
8. Здійснити вибір комутаційної, захисної та вимірювальної апаратури мереж 10 кВ і 0,4 кВ відповідно до розрахункових параметрів і вимог нормативних документів;
9. Розробити схему компенсації реактивної потужності на шинах 0,4 кВ цехових підстанцій і 10 кВ ГПП з метою підвищення коефіцієнтів потужності та зменшення втрат електроенергії;
10. Виконати розподіл електроприймачів у мережах до 1000 В, здійснити вибір розподільчих пунктів, апаратів захисту та перевірку їх селективності;
11. Провести розрахунок електричних мереж за умовами допустимих втрат напруги, побудувати епюри відхилень напруги та карту селективності дії захистів;
12. Оцінити технічну та економічну ефективність прийнятих проектних рішень і обґрунтувати їх доцільність з позиції надійності, безпеки та енергоефективності системи електропостачання локомотивного депо.

2. РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Об'єкт і методи дослідження

Об'єктом дослідження є локомотивне депо в цілому і його цех по ремонту електровозів зокрема.

Вихідними даними на проектування є генплан локомотивного депо (графічна частина), характеристики виробничих приміщень (табл. 2.1), відомості ремонту електровозів (табл. 2.2), план цеху по ремонту електровозів (графічна частина)

Таблиця 2.1 - Характеристика виробничих приміщень.

| № цеху на генплані | Найменування цехів              | Встановлена потужність, кВт | Категорії ЕП |
|--------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------|
| 1                  | Цех по ремонту тепловозів       | 1780,0                      | II           |
| 2                  | Цех по ремонту колійної техніки | 930,0                       | II           |
| 3                  | Цех по ремонту електровозів     | -                           | II           |
| 4                  | Адміністративний корпус         | 450,0                       | III          |
| 5                  | Побутовий корпус                | 100,0                       | III          |
| 6                  | Склад кисневих балонів          | 200,0                       | II           |
| 7                  | Склад балонів зрідженого газу   | 150,0                       | II           |
| 8                  | Матеріальний склад              | 70,0                        | III          |
| 9                  | Компресорна<br>10 кВ<br>0,38 кВ | 6400,0<br>850,0             | II           |
| 10                 | Роздаткова ГСМ                  | 400,0                       | II           |
| 11                 | Склад піску                     | 350,0                       | III          |
| 12                 | Піскосушарка                    | 460,0                       | III          |
| 13                 | Насосна<br>10 кВ<br>0,38 кВ     | 2500,0<br>1200,0            | II           |



Таблиця 2.2 – Відомості про електричні навантаження цеху по ремонту електровозів

| Номер на<br>плані | Найменування<br>електроприймача       | Встановлена потужність<br>ЕП, кВт |
|-------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 1                 | Зварювальний трансформатор            | 20,0                              |
| 2                 | Зарядний пристрій                     | 15,0                              |
| 3                 | Зварювальний трансформатор<br>ПВ=40 % | 20,0                              |
| 4                 | Зарядний пристрій                     | 15,0                              |
| 5-8               | Домкрат                               | 15,0                              |
| 9                 | Кран-балка                            | 30,0                              |
| 10-11             | Механічний прес                       | 3,50                              |
| 12                | Свердлильний верстат                  | 2,0                               |
| 13                | Точильний верстат                     | 5,50                              |
| 14                | Випрямляч                             | 8,0                               |
| 15-17             | Зварювальний трансформатор            | 20,0                              |
| 18                | Вертикально-свердлильний<br>верстат   | 5,0                               |
| 19,20             | Фрезерний верстат                     | 3,0                               |
| 21                | Прес фрикційний                       | 10,0                              |
| 22-25             | Випробувальний стенд                  | 5,50                              |
| 26-27             | Муфельна піч                          | 15,0                              |
| 28                | Вулканізаційний верстат               | 3,0                               |
| 29-30             | Зварювальний трансформатор            | 20,0                              |
| 31                | Кран-балка                            | 10,0                              |
| 32                | Кран-балка                            | 7,50                              |
| 33                | Вертикально-свердлильний<br>верстат   | 5,0                               |
| 34                | Зварювальний трансформатор            | 20,0                              |

## Продовження таблиці 2.2

|       |                                    |      |
|-------|------------------------------------|------|
| 35-36 | Фрезерувальний верстат             | 3,0  |
| 37    | Кран-балка                         | 10,0 |
| 38    | Випрямляч                          | 20,0 |
| 39    | Координатно-розточувальний верстат | 22,0 |
| 40    | Трубозгинаючий верстат             | 7,50 |
| 41    | Рейкорізний верстат                | 7,50 |
| 42,43 | Фрезерний верстат                  | 15,0 |
| 44-46 | Шліфувальний верстат               | 7,50 |
| 47    | Точильний верстат                  | 5,50 |
| 48    | Токарний верстат                   | 15,0 |
| 49,50 | Гідравлічний прес                  | 15,0 |
| 51    | Зварювальний трансформатор         | 20,0 |
| 52    | Кран-балка                         | 15,0 |
| 53    | Зварювальний трансформатор         | 10,0 |
| 54    | Електромот                         | 20,0 |
| 55    | Електропіч                         | 30,0 |
| 56,57 | Вентилятор горна                   | 15,0 |
| 58,59 | Кран-балка                         | 10,0 |
| 60,61 | Токарний верстат                   | 15,0 |
| 62,63 | Вентилятор                         | 20,0 |
| 64-70 | Вентилятор                         | 7,50 |

## 2.2 Визначення розрахункового електричного навантаження цеху по ремонту електровозів

Розрахунок проводимо у наступній послідовності [18-20].

Для розрахунків електричних навантажень будемо використовувати табл.

2.2.

Розрахунок середнього активного навантаження (на прикладі різних верстатів):

$$P_{cm} = K_{\phi} \cdot P_{ном}, \text{ кВт},$$

де  $P_{ном}$  - номінальна сумарна активна потужність;

Середнє реактивне навантаження:

$$Q_{cm} = P_{cm} \cdot \operatorname{tg} \varphi \text{ кВАр}.$$

де  $\operatorname{tg} \varphi$  - визначається за відповідним значенням коефіцієнта потужності.

Середньозважений коефіцієнт використання:

$$K_{в.ср} = \frac{\sum P_{cm}}{\sum P_{ном}}.$$

За кривими в залежності від середньозваженого коефіцієнта використання  $K_{в.ср}$  та  $n_e$  для даної групи визначається коефіцієнта максимуму активної потужності:

$$n_e = \frac{\left[ \sum_1^n P_{ном} \right]^2}{\sum_1^n P_{ном}^2}$$

Розрахункова активна  $P_{\mathcal{M}}$  і реактивна  $Q_{\mathcal{M}}$  максимальні потужності групи:

$$P_{\mathcal{M}} = K_{\mathcal{M}} \cdot P_{cm}, \text{ кВт},$$

$$Q_{\mathcal{M}} = Q_{cm} \text{ при } n_e > 10,$$

$$Q_{\mathcal{M}} = 1,1 \cdot Q_{cm} \text{ при } n_e \leq 10.$$

Розрахункове навантаження освітлення визначається за встановленою потужністю і коефіцієнтом попиту:

$$P_{p.o.} = P_{н.о.} \cdot K_{c.o.}$$

де  $K_{c.o.}$  приймається за довідником;

$$P_{н.о.} \text{ знаходиться як: } P_{н.о.} = P_{уд.о.} \cdot F ,$$

де  $P_{уд.о.}$  - питома густина освітлювального навантаження, Вт/м<sup>2</sup> (приймається по довіднику).

Повне розрахункове навантаження (з урахуванням освітлення) визначається:

$$S_p = \sqrt{(P_p + P_{p.o.})^2 + Q_p^2} .$$

Розрахунковий струм:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} .$$

Таблиця 2.3 - Довідникові дані для ЕП цеху по ремонту електровозів

| Номер на плані      | Назва електроприймача              | Встановлена потужність ЕП, кВт | $K_B$ | $\cos\varphi$ | $\operatorname{tg}\varphi$ | Група ЕП |
|---------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------|---------------|----------------------------|----------|
| 1,15-17,29-30,34,51 | Зварювальний трансформатор         | 20,0                           | 0.25  | 0.35          | 2.68                       | A        |
| 2,4                 | Зарядний пристрій                  | 15,0                           | 0.2   | 0.8           | 0.75                       | A        |
| 3                   | Зварювальний трансформатор ПВ=40 % | 12,60                          | 0.25  | 0.4           | 2.3                        | A        |
| 5-8                 | Домкрат                            | 15,0                           | 0.1   | 0.6           | 1.33                       | A        |
| 9,52                | Кран-балка                         | 30,0                           | 0.06  | 0.5           | 1.73                       | A        |
| 10-11               | Механічний прес                    | 3,50                           | 0.17  | 0.5           | 1.73                       | A        |
| 12                  | Свердлильний верстат               | 2,0                            | 0.12  | 0.5           | 1.73                       | A        |
| 13,47               | Точильний верстат                  | 5,50                           | 0.12  | 0.5           | 1.73                       | A        |
| 14                  | Випрямляч                          | 8,0                            | 0.6   | 0.6           | 1.33                       | A        |
| 18,33               | Вертикально-свердлильний верстат   | 5,0                            | 0.12  | 0.5           | 1.73                       | A        |
| 19-20               | Фрезерний верстат                  | 3,0                            | 0.12  | 0.5           | 1.73                       | A        |
| 21                  | Прес фрикційний                    | 10,0                           | 0.17  | 0.5           | 1.73                       | A        |
| 22-25               | Випробувальний стенд               | 5,50                           | 0.3   | 0.7           | 1.02                       | A        |
| 26-27               | Муфельна піч                       | 15,0                           | 0.5   | 0.95          | 0.33                       | A        |
| 28                  | Вулканізаційний верстат            | 3,0                            | 0.12  | 0.5           | 1.73                       | A        |
| 31,37,58,59         | Кран-балка                         | 10,0                           | 0.06  | 0.5           | 1.73                       | A        |
| 32                  | Кран-балка                         | 7,50                           | 0.06  | 0.5           | 1.73                       | A        |

Продовження таблиці 2.3

|          |                                    |      |      |      |      |   |
|----------|------------------------------------|------|------|------|------|---|
| 35-36    | Фрезерувальний верстат             | 3,0  | 0.12 | 0.5  | 1.73 | А |
| 38       | Випрямляч                          | 20,0 | 0.6  | 0.6  | 1.33 | А |
| 39       | Координатно-розточувальний верстат | 22,0 | 0.12 | 0.5  | 1.73 | А |
| 40       | Трубозгинальний верстат            | 7,50 | 0.12 | 0.5  | 1.73 | А |
| 41       | Рейкорізний верстат                | 7,50 | 0.12 | 0.5  | 1.73 | А |
| 42,43    | Фрезерний верстат                  | 15,0 | 0.12 | 0.5  | 1.73 | А |
| 44-46    | Шліфувальний верстат               | 3,0  | 0.12 | 0.5  | 1.73 | А |
| 48,60,61 | Токарний верстат                   | 15,0 | 0.12 | 0.5  | 1.73 | А |
| 49,50    | Гідравлічний прес                  | 15,0 | 0.17 | 0.5  | 1.73 | А |
| 52       | Кран-балка                         | 15,0 | 0.06 | 0.5  | 1.73 | А |
| 53       | Зварювальний трансформатор         | 10,0 | 0.25 | 0.35 | 2.68 | А |
| 54       | Електромот                         | 20,0 | 0.8  | 0.8  | 0.75 | Б |
| 55       | Електропіч                         | 30,0 | 0.75 | 0.95 | 0.33 | Б |
| 56,57    | Вентилятор горна                   | 15,0 | 0.75 | 0.85 | 0.62 | Б |
| 62,63    | Вентилятор                         | 20,0 | 0.6  | 0.6  | 1.33 | Б |
| 64-70    | Вентилятор                         | 7,50 | 0.6  | 0.6  | 1.33 | Б |

Приклади розрахунків:

Встановлена потужність зварювального трансформатора, приведена до ПВ=100%:

$$P_{ном} = P_{насп} \cdot \sqrt{ПВ} = 20 \cdot \sqrt{0,4} = 20 \cdot 0,63 = 12,6 \text{ кВт};$$

Середнє активне і реактивне навантаження для зварювального трансформатора ПР1:

$$P_{см} = K_{\phi} \cdot P_{ном} = 0,25 \cdot 12,6 = 3,15 \text{ кВт};$$

$$Q_{см} = P_{см} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 3,15 \cdot 2,2 = 7,25 \text{ кВАр}.$$

Ефективне число електроприймачів для ПР1:

$$m = \frac{P_{\max ном}}{P_{\min ном}} = \frac{30}{12,6} = 2,38;$$

де  $m$  - модуль

$$m \leq 3;$$

Приймаємо  $n_e = n_{факт} = 9$ .

Розрахункові активна та реактивна потужності ПР1 відповідно до  $n_e$ :

$$P_p = K_m \cdot P_{см} = 2,2 \cdot 3,15 = 6,93 \text{ кВт};$$

$$Q_p = 1,1 \cdot Q_{см} = 1,1 \cdot 7,25 = 7,98 \text{ кВАр при } n_e < 10.$$

Коефіцієнт максимуму  $K_m$  визначаємо по [8] в функції  $n_e$  і  $K_{\phi, ср}$ .

Розрахункове навантаження освітлювальних приймачів цеху визначаємо за формулою:

$$P_{п.о.} = P_{н.о.} \cdot K_{с.о.}$$

де  $K_{с.о.}$  - коефіцієнт попиту освітлювального навантаження. Відповідно до [8] приймаємо  $K_{с.о.} = 0,95$ ;

$P_{н.о.}$  - номінальна потужність освітлювального навантаження.

$$P_{н.о.} = P_{уд.о.} \cdot F$$

де  $P_{уд.о.}$  - питоме навантаження на 1 м<sup>2</sup> площі цеху

$$P_{уд.о.} = 3,75 \text{ кВт/м}^2.$$

$F$  - площа цеху.

З урахуванням масштабу визначимо площі цехів на генплані підприємства.

Площа ковальсько-пресового цеху:

$$F = (a \cdot b) \cdot m^2 = 25 \cdot 13 \cdot 8,8^2 = 25185 m^2,$$

де  $a$  і  $b$  довжина та ширина цеху відповідно.

Тоді

$$P_{н.о.} = P_{уд.о.} \cdot F = 3,75 \cdot 25185 = 94,44 \text{ кВт};$$

$$P_{р.о.} = P_{н.о.} \cdot K_{с.о.} = 94,44 \cdot 0,95 = 89,72 \text{ кВт};$$

$$Q_{р.о.} = P_{н.о.} \cdot \operatorname{tg} \varphi = 89,72 \cdot 2,68 = 240,45 \text{ кВт}.$$

Повне розрахункове навантаження цеху (з урахуванням освітлення):

$$\begin{aligned} S_p &= \sqrt{(P_p + P_{р.о.})^2 + (Q_p + Q_{р.о.})^2} = \\ &= \sqrt{(418,55 + 89,72)^2 + (426,92 + 240,45)^2} = 838,89 \text{ кВА} \end{aligned}$$

Розрахунковий максимальний струм:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{\sqrt{(P_p^{цеху})^2 + (Q_p^{цеху})^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = \frac{\sqrt{428,84^2 + 448,47^2}}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 943,87 \text{ А}.$$

За допомогою наведених розрахунків, була визначена загальна потужність цеху по ремонту електровозів, а також знайдені пікові струми груп електроприймачів і розрахунковий струм навантаження. Дані розрахунки використовуються для правильного вибору комутаційних і захисних апаратів, а також перерізів ліній.

Таблиця розрахункових навантажень цеху з ремонту електровозів наведено у графічній частині.

## 2.3 Визначення розрахункового навантаження підприємства в цілому

Мета розрахунку - знаходження розрахункової активної, реактивної і повної потужностей, необхідних для вибору перерізу розподільних мереж, а також захисної і комутаційної високовольтної апаратури і потужності трансформаторів цехових підстанцій [6, 8, 21, 22].



Розрахункова навантаження (активна і реактивна) силових приймачів цехів визначаються з виразів:

$$P_p = K_n \cdot P_n ;$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi .$$

де  $P_n$  - сумарна встановлена потужність для всіх приймачів цеху;

$K_n$  - приймається по довідковим даним, коефіцієнт попиту;

$\operatorname{tg} \varphi$  - коефіцієнт потужності прийнятий за відповідним значенням коефіцієнта потужності;

*Приклад розрахунків для цеху по ремонту електровозів:*

Розрахункові активне і реактивне навантаження силових приймачів цеху:

$$P_p = K_n \cdot P_n = 0,5 \cdot 837,1 = 418,55 \text{ кВт};$$

$$Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi = 418,55 \cdot 1,02 = 426,92 \text{ кВАр}.$$

Номінальна потужність освітлювального навантаження цеху:

$$P_{н.о.} = P_{уд.о.} \cdot F = 3,75 \cdot 25185 = 94,44 \text{ кВт}.$$

Розрахункове освітлювальне навантаження:

$$P_{p.о.} = P_{н.о.} \cdot K_{с.о.} = 94,44 \cdot 0,95 = 89,72 \text{ кВт}.$$

Розрахункове навантаження:

$$\begin{aligned} S_p &= \sqrt{(P_p + P_{p.о.})^2 + (Q_p + Q_{p.о.})^2} = \\ &= \sqrt{(418,55 + 89,72)^2 + (426,92 + 240,45)^2} = 838,89 \text{ кВА} \end{aligned}$$

Розрахунки в цілому наведені в Додатку А.

## 2.4 Картограма та визначення ЦЕН

Картограма навантажень будується для спрощення знаходження місць розташування цехових ТП, РП, а також ГПП.

Радіуси кіл:

$$r_i = \sqrt{\frac{P_{Pi}}{\pi \cdot m}}$$

Кут сектору:

Координати ЦЕН:

$$x_0 = \frac{\sum S_{Pi} \cdot x_i}{\sum S_{Pi}}; y_0 = \frac{\sum S_{Pi} \cdot y_i}{\sum S_{Pi}}.$$

Дані представлені у табл. 2.4. Генеральний план підприємства зображений в графічній частині.

Таблиця 2.4 - Розрахункові дані.

| Номер<br>цеху на<br>генплані | P <sub>рі</sub> | P <sub>ро</sub> | r           | α       | x <sub>i</sub> | y <sub>i</sub> | Ймовірність<br>появи<br>навантаження<br>P <sub>x<sub>i</sub></sub> = P <sub>y<sub>i</sub></sub> | Примітки             |
|------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|---------|----------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
|                              | кВт             | кВт             | см          | град    | см             | см             | у.о.                                                                                            |                      |
| Споживачі 0,38 кВ            |                 |                 |             |         |                |                |                                                                                                 |                      |
| 1.                           | 1068.0          | 199.50          | 1.160       | 56.670  | 5.0            | 3.80           | 0.111270                                                                                        | m=300                |
| 2.                           | 744.0           | 192.10          | 0.99690     | 73.8650 | 8.50           | 2.20           | 0.082170                                                                                        | кВт/см²              |
| 3.                           | 418.60          | 89.720          | 0.73460     | 63.5480 | 4.30           | 5.90           | 0.044620                                                                                        | y <sub>0</sub> =3.99 |
| 4.                           | 225.0           | 48.720          | 0.53910     | 64.0780 | 8.40           | 1.0            | 0.024030                                                                                        | см                   |
| 5.                           | 50.0            | 11.970          | 0.25650     | 69.5370 | 4.40           | 7.30           | 0.00540                                                                                         | x <sub>0</sub> =8,12 |
| 6.                           | 60.0            | 3.8110          | 0.26030     | 21.5010 | 5.70           | 7.70           | 0.00560                                                                                         | см                   |
| 7.                           | 45.0            | 4.0440          | 0.22820     | 29.6860 | 5.70           | 7.10           | 0.0043050                                                                                       |                      |
| 8.                           | 17.50           | 36.430          | 0.23930     | 243.190 | 10.70          | 6.90           | 0.0047340                                                                                       |                      |
| 9.                           | 595.0           | 45.650          | 0.82470     | 25.6510 | 12.70          | 3.50           | 0.0562380                                                                                       |                      |
| 10.                          | 160.0           | 22.770          | 0.44050     | 44.8460 | 15.30          | 3.90           | 0.0160440                                                                                       |                      |
| 11.                          | 87.50           | 12.010          | 0.3250      | 43.4470 | 16.80          | 3.60           | 0.0087352950                                                                                    |                      |
| 12.                          | 161.0           | 12.990          | 0.42980     | 26.870  | 18.30          | 3.70           | 0.0152731130                                                                                    |                      |
| 13.                          | 840.0           | 10.420          | 0.95020     | 4.41280 | 12.750         | 0.40           | 0.074653350                                                                                     |                      |
| Споживачі 10 кВ              |                 |                 |             |         |                |                |                                                                                                 |                      |
| 9.                           | 4480.0          | 3360            | 2.1807<br>9 |         | 12.70          | 3.50           | 0.3932710                                                                                       |                      |
| 13.                          | 1750.0          | 1312.5          | 1.363       |         | 12.750         | 0.40           | 0.153621360                                                                                     |                      |

Приклад розрахунку:

Радіус кола:

$$r_i = \sqrt{\frac{P_{Pi}}{\pi \cdot m}} = \sqrt{\frac{508,27}{3,14 \cdot 300}} = 0,73 \text{ см}$$

Кут сектору освітлювального навантаження:

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot P_{Po}}{S_{Pi}} = \frac{360^\circ \cdot 89,72}{508,27} = 63,55 \text{ град}$$

Так як розмістити ГПП у ЦЕН неможливо (координати ЦЕН співпадають з місцеположенням 2-го цеху), зміщуємо його в сторону. Фактичні координати розташування ГПП наступні:

$$x_0 = 570 \text{ м}; y_0 = 62 \text{ м}.$$

Побудова зони розсіювання ЦЕН.

Полуосі еліпса:

$$R_x = \frac{\sqrt{3}}{h_x}; R_y = \frac{\sqrt{3}}{h_y};$$

$$\text{де } h_x = \frac{1}{\sigma_x \cdot \sqrt{2}}; h_y = \frac{1}{\sigma_y \cdot \sqrt{2}}$$

$\sigma_x, \sigma_y$  - дисперсії випадкових координат.

Для цеху по ремонту електровозів:

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^n P_{xi} \cdot (x_i - x_{0a})^2 = 10,99;$$

$$\sigma_y^2 = \sum_{i=1}^n P_{yi} \cdot (y_i - y_{0a})^2 = 2,65.$$

де  $P_{xi}, P_{yi}$  - емпірична ймовірність появи  $x_i, y_i$ , у о.

$$P_{xi} = P_{yi} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$$

$$R_x = \frac{\sqrt{3}}{h_x} = \frac{\sqrt{3}}{0,21} = 81,2 \text{ мм}; R_y = \frac{\sqrt{3}}{h_y} = \frac{\sqrt{3}}{0,43} = 39,9 \text{ мм}$$

Отриманий результат зобразимо в графічній частині.

## 2.5 Вибір числа і потужності трансформаторів цехових підстанцій

При встановленні групи цехових трансформаторів на великих промислових підприємствах їх номінальна потужність вибирається єдиною для всієї групи трансформаторів і визначається з урахуванням густини навантаження [6, 8, 23-33]. Визначити питому густину навантаження можна за допомогою формули:

$$\sigma = \frac{S_p^H}{F_{\text{ц}}} = \frac{7687,17}{210906} = 0,036 \text{ кВА} / \text{м}^2$$

де  $F_{\text{ц}}$  - площа всіх цехів підприємства, м<sup>2</sup>.

Так як  $\sigma < 0,1$  то відповідно до рекомендацій приймаємо номінальну потужність одного трансформатора  $S_{\text{н.тр}} = 630$  кВА [8].

Дотримуючись при цьому необхідного коефіцієнта завантаження: для споживачів I-кат.  $\beta = 0,65 - 0,7$ , II-кат.  $\beta = 0,7 - 0,8$ , III-кат.  $\beta = 0,9 - 0,95$ . Розрахунок коефіцієнта завантаження в попередньому виборі трансформаторів ведемо по активній потужності.

Розрахункове число трансформаторів, визначається за формулою:

$$N_{\min} = \frac{\Sigma(P_p^H + P_{p.o.})}{\beta_T \cdot S_{\text{н.тр}}} + \Delta N,$$

де  $\beta_T$  - в нормальному режимі коефіцієнт завантаження трансформаторів (беремо 0,7 відповідно [8]).

$\Delta N$  - додавання до найближчого цілого числа;

$\Sigma P_p^H$  - номінальна розрахункова активна потужність у мережах до 1000 В, кВт.

Визначаємо розрахункове число трансформаторів:

$$N_{\min} = \frac{5161,64}{0,7 \cdot 630} = 11,7.$$

$\Delta N = 0,3$ .

Економічно оптимальне число трансформаторів:

$$N_{\text{тр.ек}} = N_{\min} + m$$

$m$  - додаткове число трансформаторів. У нашому випадку  $m = 1$  згідно з кривими визначення додаткового числа трансформаторів. Також це обумовлено зручністю розміщення трансформаторів в депо (графічна частина).

Приймаємо кількість трансформаторів рівну 13.

Здійснити рівномірний розподіл активних навантажень цехів між ними можна після вибору потужності та числа наявних цехових трансформаторів. Визначити активне навантаження, що припадає на один цеховий трансформатор, можна за наступною формулою:

$$P_1 = \frac{\sum (P_p + P_{p.o.})}{N}$$

$$P_1 = \frac{5161,64}{13} = 430,137 \text{ кВт.}$$

Число трансформаторів  $N_i$ , яке слід установити в тому чи іншому цеху, визначається розподілом навантаження цеху  $(P_p + P_{p.o.})$  на  $P_1$ :

$$N_1 = \frac{(P_p + P_{p.o.})_i}{P_1}$$

$$N_1 = \frac{1267,5}{430,14} = 2,94.$$

Виконаємо систематизацію розрахунку шляхом відображення отриманого числа трансформаторів, що встановлюються у кожному цеху за допомогою таблиці 2.5

Таблиця 2.5 - Розподіл трансформаторних підстанцій по цехах

| № цеху на генплані | КТП     | Кількість і потужність трансформаторів |
|--------------------|---------|----------------------------------------|
| 1.                 | КТП-1.1 | 2хТМ – 630/6-10                        |
|                    | КТП-1.2 | 1хТМ – 630/6-10                        |
| 2.                 | КТП-2   | 2хТМ – 630/6-10                        |
| 3.                 | КТП-3   | 1хТМ – 630/6-10                        |
| 4.                 | КТП-4   | 1хТМ – 630/6-10                        |
| 6.                 | КТП-6   | 1хТМ – 630/6-10                        |
| 9.                 | КТП-9   | 2хТМ – 630/6-10                        |
| 11.                | КТП-11  | 1хТМ – 630/6-10                        |
| 13.                | КТП-13  | 2хТМ – 630/6-10                        |

## 2.6 КРП на шинах 0,4 кВ ЦТП

Передана через силові трансформатори реактивна потужність:

$$Q_{\max} = \sqrt{(n \cdot \beta \cdot S_{н.тр})^2 - P_p^2}.$$

Коефіцієнт завантаження трансформаторів по можливості приймаємо близьким до 0,65–0,7, оскільки при цьому забезпечується максимальний коефіцієнт корисної дії трансформатора.

$$Q_{\max} = \sqrt{(13 \cdot 0,7 \cdot 630)^2 - 5161,64^2} = 2494,94 \text{ кВАр}.$$

Сумарна потужність батарей, для цієї групи трансформаторів нижче 1000 В складає:

$$Q_{БК.Н1} = Q_{р.НН} - Q_{\max};$$

де  $Q_{р.НН}$  - сумарне розрахункове реактивне навантаження нижче 1000 В.

$$Q_{БК.Н1} = Q_{р.НН} - Q_{\max} = 5161,64 - 2494,94 = 2666,71 \text{ кВАр}$$

Визначити додаткову сумарну потужність БК до 1000 В для даної групи трансформаторів  $Q_{БК.Н2}$  можна за допомогою формули:

$$Q_{БК.Н2} = Q_{р.НН} - Q_{БК.Н1} - \gamma \cdot N_{тр.ек} \cdot S_{ном.тр};$$

де  $\gamma$  - розрахунковий коефіцієнт, який визначається в залежності від показників  $K_{p1}$ ,  $K_{p2}$  та схеми живлення ЦТП.

$$Q_{БК.Н2} = 5161,64 - 2666,71 - 0,49 \cdot 13 \cdot 630 = -1518,2 \text{ кВАр};$$

Так як  $Q_{БК.Н2} < 0$ , то для зазначеної групи трансформаторів значення реактивної потужності приймається рівною нулю.

$$\text{Значить } Q_{БК.Н} = Q_{БК.Н1} + Q_{БК.Н2} = 2494,94 \text{ кВАр.}$$

Вибираємо потужність КУ близьку до розрахункової реактивної потужності. З умовою, що:  $Q_p - Q_{КУ} \leq Q_{\max}$ .

Вибрані конденсаторні установки типу УКМ 58-04 зведемо в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Розподіл конденсаторних установок

| № цеху<br>на<br>генплані | КТП                        | Кількість і<br>потужність<br>трансформаторів | Q <sub>розр</sub> на 1<br>трансформатор,<br>кВАр | %<br>відносно<br>$\Sigma Q$ ,<br>кВАр | Q <sub>БК</sub> ,<br>кВАр | Q <sub>БК ф</sub> ,<br>кВАр | Q <sub>факт</sub> ,<br>кВАр |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1                        | КТП-<br>1.1<br>КТП-<br>1.2 | 2хТМ – 630/6-10<br>1хТМ - 630/6-10           | 492,21                                           | 0,08641                               | 230,42                    | 1х265                       | 227,2                       |
|                          |                            |                                              | 492,21                                           | 0,08641                               | 230,42                    | 1х265                       | 227,2                       |
|                          |                            |                                              | 492,21                                           | 0,08641                               | 230,42                    | 150                         | 227,2                       |
| 2                        | КТП-<br>2                  | 2хТМ – 630/6-10                              | 585,46                                           | 0,1028                                | 274,08                    | 1300                        | 285,5                       |
|                          |                            |                                              | 585,46                                           | 0,1028                                | 274,08                    | 1300                        | 285,5                       |
| 3                        | КТП-<br>3                  | 1хТМ - 630/6-10                              | 667,37                                           | 0,1172                                | 312,42                    | 1335                        | 332,4                       |
| 4                        | КТП-<br>4                  | 1хТМ - 630/6-10                              | 315,32                                           | 0,0554                                | 147,62                    | 1х150                       | 165,3                       |
| 6                        | КТП-<br>6                  | 1хТМ - 630/6-10                              | 305,49                                           | 0,0536                                | 143,01                    | 1х150                       | 155,5                       |
| 9                        | КТП-<br>9                  | 2хТМ – 630/6-10                              | 392,07                                           | 0,0688                                | 183,54                    | 1х180                       | 212,1                       |
|                          |                            |                                              | 392,07                                           | 0,0688                                | 183,54                    | 1х180                       | 212,1                       |
| 11                       | КТП-<br>11                 | 1хТМ - 630/6-10                              | 318,64                                           | 0,0559                                | 149,17                    | 1х150                       | 168,6                       |
| 13                       | КТП-<br>13                 | 2хТМ – 630/6-10                              | 328,96                                           | 0,0577                                | 154,0                     | 1х150                       | 178,9                       |
|                          |                            |                                              | 328,96                                           | 0,0577                                | 154,0                     | 1х150                       | 178,9                       |

### 2.6.1 Розподіл потужності батарей конденсаторів по вузлам навантаження цехової мережі напругою до 1000 В.

Розглянемо можливість розподілу потужності конденсаторів до 1000 В в її мережі. Підставою доцільності даного розподілу, є додаткове зменшення наведених витрат при врахуванні технічної допустимості підключення окремих батарей.



Схема живлення навантажень показана на рис.2.1. Реактивні навантаження кожного розподільчого пункту і опору ліній живлення зазначені в таблиці 2.7. Сумарна потужність КБ на напрузі 0,38 кВ визначена розрахунком і дорівнює 312,4 кВАр. З мережі 10 кВ передається  $Q = 61,2$  кВАр. Розподілимо конденсаторні установки між розподільними пунктами.

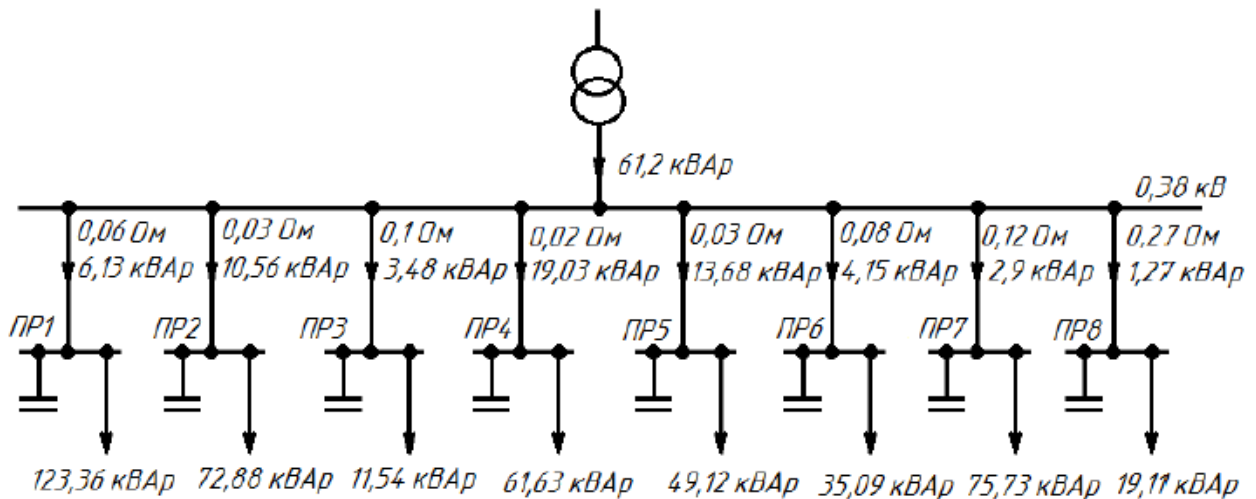


Рисунок 2.1 - Розрахункова схема розміщення КБ у електричних мережах до 1 кВ.

*Приклад розрахунків:*

1. Визначаємо еквівалентний опір мережі

$$r_{ек} = \left( \sum_{i=1}^n \frac{1}{r_i} \right)^{-1}$$

$$r_{ек} = \frac{1}{\frac{1}{0,06} + \frac{1}{0,03} + \frac{1}{0,1} + \frac{1}{0,02} + \frac{1}{0,03} + \frac{1}{0,08} + \frac{1}{0,12} + \frac{1}{0,27}} = 5,69 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

2. Реактивна потужність передана з мережі 10 кВ розподіляється між ПР1-ПР8 у відповідності з виразом:

$$Q_i = \frac{Q \cdot r_{ек}}{r_i};$$

$$Q_1 = \frac{61,2 \cdot 5,69 \cdot 10^{-3}}{0,06} = 6,23 \text{ кВАр}$$

3. Розрахункова потужність КБ, що встановлюються біля розподільних пунктів ПР1-ПР8:

$$Q_{БК} = Q_{р1} - Q_1 = 123,36 - 6,23 = 117,12 \text{ кВАр.}$$

4. Вибираємо конденсаторну установку, потужність якої близька або рівна потужності реактивного навантаження даного ПР.

Для ПР1 вибираємо конденсаторну установку типу УКМ58-0,4-112,5-37,5УЗ потужністю 112,5 кВАр.

5. Сумарна потужність намічених до встановлення батарей становить:

$$Q_{БК} = \sum_{i=1}^{i=8} Q_{БКi} = 112,5 + 67 + 0 + 50 + 30 + 30 + 67 + 20 = 376,5 \text{ кВАр.}$$

Всі розрахункові дані та прийняті потужності конденсаторних установок зведемо в таблицю 2.7.

Таблиця 2.7 - Конденсаторні установки для ПР.

| № шафи | $Q_{pi}$ , кВАр | $r_i$ , Ом | $Q_i$ , кВАр | $Q_{iБК}$ , кВАр | $Q_{БК \text{ факт}}$ , кВАр | Тип                    |
|--------|-----------------|------------|--------------|------------------|------------------------------|------------------------|
| ПР1    | 123.36          | 0.06       | 6.23         | 117.12           | 112.5                        | УКМ58-0,4-112,5-37,5УЗ |
| ПР2    | 72.88           | 0.03       | 108.7        | 62.01            | 67,0                         | УКМ58-0,4-67-33,3УЗ    |
| ПР3    | 11.54           | 0.10       | 3.49         | 8.05             | 0,0                          | -                      |
| ПР4    | 61.63           | 0.02       | 19.59        | 42.04            | 50,0                         | УКМ58-0,4-50-25УЗ      |
| ПР5    | 49.12           | 0.03       | 13.91        | 35.21            | 30,0                         | УКМ58-0,4-30-10УЗ      |
| ПР6    | 35.09           | 0.08       | 4.19         | 30.91            | 30,0                         | УКМ58-0,4-30-10УЗ      |
| ПР7    | 75.73           | 0.12       | 2.9          | 72.80            | 67,0                         | УКМ58-0,4-67-33,3УЗ    |
| ПР8    | 19.11           | 0.27       | 1.28         | 17.83            | 20,0                         | УКМ58-0,4-20-10УЗ      |

Був розглянутий варіант розподілу по вузлам навантаження потужності конденсаторів цехової мережі напругою до 1000 В. Від шин 0,4 кВ трансформаторної підстанції відходять 8 радіальних ліній із опорами  $r_i$ , що живлять 8 силових шаф з реактивними навантаженнями  $Q_{pi}$ , причому  $Q_p = \sum Q_{pi}$  та  $Q_{БК} \leq Q_p$ .

## 2.7 КРП на шинах 10 кВ ГПП

Розрахункове реактивне навантаження в мережах 6/10 кВ промислових підприємств знаходиться:

$$Q_{mp} = Q_{mp.max} - Q_{БК.Н} + \Delta Q_{mp} = 5161,64 - 2840 + 507 = 2828,64 \text{ кВАр.}$$

$$\begin{aligned} Q_{БК.ВН} &= Q_{ВН.розр} + Q_{mp} + \Delta Q_{ГПП} - Q_C = \\ &= 6230 + 2828,64 + 1585 - 2705,66 = 6380,23 > 0 \end{aligned}$$

$Q_{ВН.розр}$  - розрахункове навантаження на приймачів 10 кВ

$Q_C$  - реактивна потужність, яку можна взяти з системи.

$$Q_C = \alpha \cdot P_p = 11591 \cdot 0,24 = 2705,66 \text{ кВАр.}$$

де  $P_p$  - навантаження на шинах НН трансформаторів ГПП з урахуванням втрат.

$\alpha$  - коефіцієнт, що враховує розташування підприємства.

$\alpha = 0,24$ , при напрузі лінії живлення 35 кВ.

Вибираємо 2 конденсаторні установки типу УКЛ56-10,5-3150У3 з номінальною потужністю 3150 кВАр.

## 2.8 Висновки до розділу

1. Виконано комплексне дослідження електричних навантажень локомотивного депо в цілому та цеху по ремонту електровозів зокрема, що дозволило обґрунтувати основні технічні рішення з побудови системи електропостачання підприємствах.

2. На основі вихідних даних та довідникових коефіцієнтів визначено розрахункові активні, реактивні та повні навантаження цеху по ремонту електровозів із урахуванням режимів роботи електроприймачів і освітлювального навантаження. Отримані значення розрахункових струмів створюють основу для подальшого вибору перерізів кабельних ліній, комутаційної та захисної апаратури.

3. Виконано розрахунки електричних навантажень підприємства у цілому, що дало змогу оцінити сумарні потужності, необхідні для вибору

трансформаторів, розподільних мереж та обладнання головної понижаючої підстанції. Побудова картограми навантажень і визначення центру електричних навантажень дозволили раціонально розмістити цехові трансформаторні підстанції та ГПП з мінімізацією втрат електроенергії та довжин ліній живлення.

4. На підставі розрахованої густини навантаження обґрунтовано вибір кількості та номінальної потужності трансформаторів цехових підстанцій, забезпечивши допустимі коефіцієнти їх завантаження для споживачів різних категорій надійності. Запропонований розподіл трансформаторів по цехах відповідає вимогам надійності електропостачання та зручності експлуатації.

5. Проведено розрахунок і вибір засобів КРП на шинах 0,4 кВ цехових підстанцій та на шинах 10 кВ ГПП. Запропоновано використання конденсаторних установок з оптимальним розподілом їх потужності як по підстанціях, так і по вузлах навантаження, що обмежує зниження перетоків реактивної потужності, зменшення втрат у мережах та підвищення коефіцієнта потужності системи електропостачання.

6. Отримані результати розрахунків підтверджують технічну та економічну доцільність прийнятих рішень і можуть бути використані для вибору обладнання та розроблення заходів з підвищення енергоефективності і надійності електричних мереж.

### 3. ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

#### 3.1 Схема зовнішнього електропостачання

ЕП заводу відбувається від ПС енергосистеми по двох ПЛЕП напругою 35 кВ. При одиничному джерелі живлення з метою резервування застосовується схема зовнішнього електропостачання з двома радіальними лініями [6, 8].

Згідно розрахункового ЦЕН на території підприємства розміщується ГПП.

Обґрунтування даного рішення представлено нижче.

$$U = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{L} + \frac{2500}{P_p}}} = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{8} + \frac{2500}{11,39}}} \approx 57,579.$$

Так як ще не вибрані трансформатори ГПП, то втрати потужності у трансформаторах визначаються наступним чином:

$$\Delta P_{T.ГПП} = 0,02 \cdot S_{p\Sigma} = 0,02 \cdot 15847,5 = 316,9 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_{T.ГПП} = 0,1 \cdot S_{p\Sigma} = 0,1 \cdot 15847,5 = 1585 \text{ кВАр}.$$

$$S_{p\Sigma} = \sqrt{(P_{p\Sigma} + \Delta P_{mp} + \Delta P_{ц.mp} + \Delta P_{10кВ})^2 + (Q_{p\Sigma} + \Delta Q_{mp} + \Delta Q_{ц.mp} + \Delta Q_{10кВ} - Q_{KV})^2} = 11902 \text{ кВА}$$

де  $Q_{KV}$  - потужність компенсуючих пристроїв.

Сумарну розрахункову потужність підприємства по відношенню до ВН трансформаторів ГПП:

$$S_{p.ГПП} = \sqrt{(P_{p\Sigma} + \Delta P_{mp.ГПП} + \Delta P_{ц.mp} + \Delta P_{10кВ})^2 + (Q_{p\Sigma} + \Delta Q_{mp.ГПП} + \Delta Q_{ц.mp} + \Delta Q_{10кВ} - Q_{KV})^2} = 11902 \text{ кВА}$$

Потужність трансформаторів на ГПП:

$$S_{н.mp} = \frac{S_{p.ГПП}}{2 \cdot \beta_m}$$

де  $\beta_m = 0,7$ .

Звідси:

$$S_{н.тр} = \frac{S_{р.ГПП}}{2 \cdot \beta_m} = \frac{11902}{2 \cdot 0,7} = 8501,5 \text{ кВА}.$$

Приймаємо до установки на ГПП два трансформатори типу *ТДНС* 10000 / 35.

Із врахуванням  $\beta_m = 0,7$ :

$$S_{р.ГПП} = 11902 \text{ кВА} < 1,4 \cdot S_{н.тр} = 1,4 \cdot 10000 = 14000 \text{ кВА}.$$

Лінії електроживлення здійснюються проводом *АС*. Вибір перерізів проводу проводимо по економічній густині струму

$$I_p = \frac{S_{р.ГПП}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{11902}{\sqrt{3} \cdot 35} = 196,34 \text{ А}$$

В аварійному режимі:

$$I_{р.макс} = \frac{S_{р.ГПП}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{11902}{\sqrt{3} \cdot 35} = 196,34 \text{ А}$$

При  $T_m = 3000 - 5000$  годин приймаємо  $j_{ек} = 1,1 \text{ А / мм}^2$ .

Економічно доцільний переріз проводів становить:

$$F_{ек} = \frac{I_p}{j_{ек}}$$

$$F_{ек} = \frac{98,17}{1,1} = 89,25 \text{ мм}^2$$

Приймаємо для ПЛЕП провід марки *АС* - 16/2,7. Значення допустимого тривалого струму:

$$I_{дон} = 111 \text{ А}.$$

Вибраний переріз повинен задовольняти умову

$$1,3 \cdot I_{дон} \geq I_{розр},$$

$$1,3 \cdot I_{дон} = 1,3 \cdot 111 = 144,3 \text{ А} > I_{р.макс} = 196,34 \text{ А}, \text{ умова не виконується.}$$

Отже, відповідно збільшується переріз проводу:

Прийнято провід марки *АС* – 35 / 6,2. Значення допустимого тривалого струму:

$$I_{дон} = 175 \text{ А}.$$

$$1,3 \cdot I_{\text{дон}} = 1,3 \cdot 175 = 1227,5 \text{ A} > I_{p.\text{max}} = 196,34 \text{ A}, \text{ умова виконується.}$$

Для обраного перерізу проводу зробимо необхідні перевірки:

ЛЕП напругою 35 кВ не перевіряються;

$$F_{\text{розр}} \geq F_{\text{min.mex}} = 25 \text{ мм}^2.$$

$$F_{\text{розр}} = 35 \text{ мм}^2 > F_{\text{min.mex}} = 25 \text{ мм}^2, \text{ умова виконується;}$$

$$l_{\text{дон}} = l_{\Delta U 1\%} \cdot \Delta U_{\text{дон}\%} \cdot k_3 \geq l,$$

$$\Delta U_{\text{дон}\%} = 5\%, \Delta U_{\text{дон.ав}\%} = 10\%;$$

$$k_3 = \frac{I_{\text{дон}}}{I_p};$$

Прийнято  $l_{\Delta U 1\%} = 1,34 \text{ км}$ .

Звідси

$$l_{\text{дон}} = l_{\Delta U 1\%} \cdot \Delta U_{\text{дон}\%} \cdot k_3 = 1,34 \cdot 5 \cdot \frac{175}{98,17} = 11,94 \text{ км}.$$

$$l_{\text{дон}} = 11,94 \text{ км} > l = 8 \text{ км}.$$

ЕП заводу від ПС енергосистеми напругою 35 кВ, виконане проводом АС - 35/6,2.

На ГПП встановлені два трансформатори типу ТДНС - 10000/35.

### 3.2 Схема внутрішньої мережі 10 кВ.

РМ 10 кВ по території локомотивного депо трижильними кабелями з алюмінієвими жилами і ізоляцією з зшитого поліетилену із прокладкою у кабельних каналах [6, 7, 8]. Схема внутрішньозаводського електропостачання приведена на рис. 3.1.

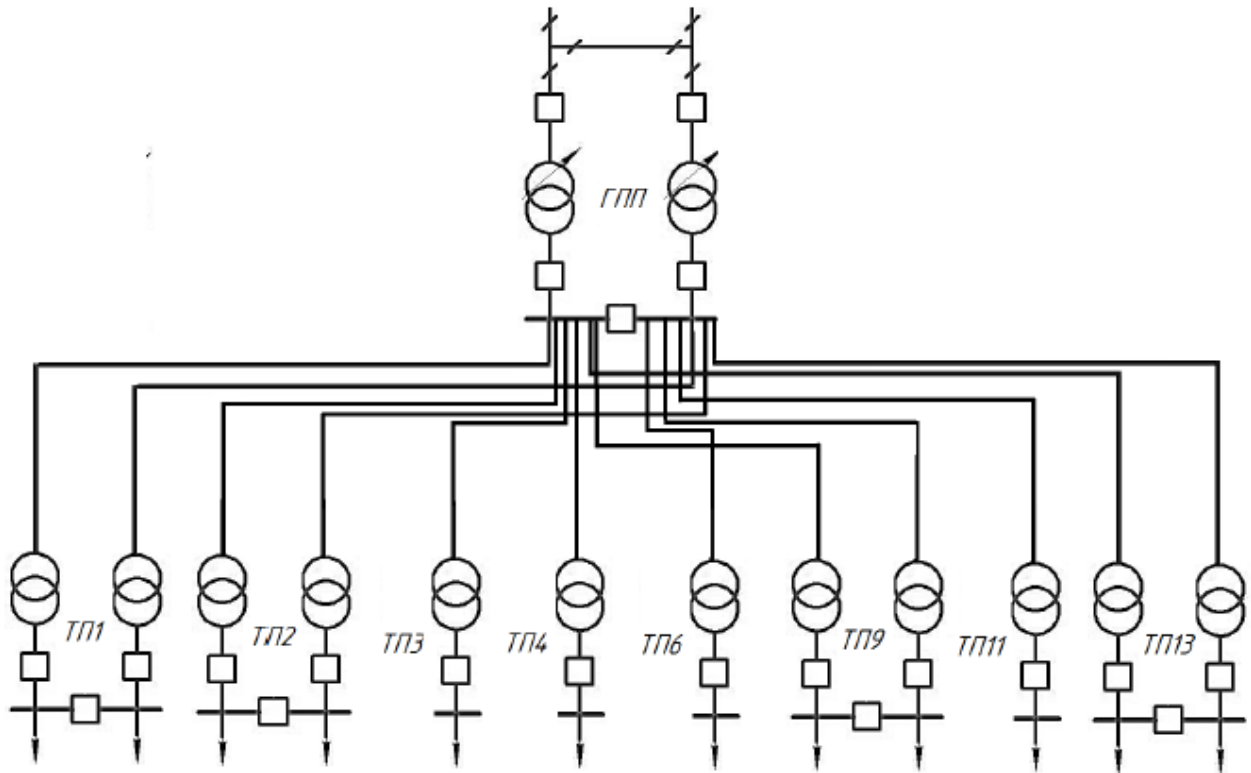


Рисунок 3.1 - Схема внутрішнього електропостачання

Економічно доцільний переріз:

$$F_{ек} = \frac{I_p}{j_{ек}},$$

При  $T_m = (3000 - 5000)$  годин приймаємо  $j_{ек} = 1,7 \text{ А / мм}^2$ .

Вибір електричного кабелю для Л-1 (ГПП - ТП-1)

$$I_p = \frac{\sqrt{(P_p^H + \Delta P_{mp})^2 + (Q_p^H + \Delta Q_{mp})^2}}{\sqrt{3} \cdot U_n} =$$

$$= \frac{\sqrt{(1267,5 + 6,5)^2 + (1476,64 + 32,7)^2}}{\sqrt{3} \cdot 10} = 97,45 \text{ А.}$$

Економічно доцільний переріз становить:

$$F_{ек} = \frac{I_p}{j_{ек}} = \frac{97,45}{1,7} = 57,2 \text{ мм}^2.$$

Приймаємо  $F = 50 \text{ мм}^2$ :  $I_{доп} = 195 \text{ А}$ .



При проданні кабелів у каналах враховуємо поправочний коефіцієнт

$k_{\text{прокл}} = 0,94$  ( $t_{\text{від.ср}} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{норм.жил}} = 65^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{розр.ср}} = 25^{\circ}\text{C}$ ), отримуємо

$$I'_{\text{доп}} = k_{\text{прокл}} \cdot I_{\text{доп}} = 0,94 \cdot 195 = 183,3 \text{ A}.$$

Перевірка обраного перерізу:

$$I_p \leq I'_{\text{доп}}$$

$$97,45 \text{ A} < 183,3 \text{ A};$$

Таким чином, обраний переріз проходить по нормальному і післяаварійному режимам.

Для лінії Л-1 приймаємо кабель марки АПвП - 1 (3х50).

Результати розрахунків по вибору перерізів КЛ РМ 0,4 кВ зведені в таблицях 3.1 і 3.2.

Таблиця 3.1 -Вибір перерізів КЛ РМ 10 кВ

| № | Номер лінії | Призначення лінії | Кількість ліній | Розрахункове навантаження на один кабель |                                        | Довжина лінії $l$ , км | Спосіб прокладки | Поперечний коефіцієнт прокладки кабелю | Марка і перетин кабелю, обраного за умовою допустимого нагріву $S$ , мм <sup>2</sup> | Допустиме навантаження на один кабель |                                       |
|---|-------------|-------------------|-----------------|------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------|------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
|   |             |                   |                 | у нормальному режимі $I_p$ , А           | в післяаварійному режимі $I_{пав}$ , А |                        |                  |                                        |                                                                                      | в нормальному режимі $I_{доп}$ , А    | у аварійному режимі $1,25I_{доп}$ , А |
| 1 | Л-1         | ГПП-ТП1           | 3               | 57.45                                    | 114.9                                  | 0.8                    | у траншеї        | 0.94                                   | АПвП-1(3□50)                                                                         | 195                                   | 243.45                                |
| 2 | Л-2         | ГПП-ТП2           | 2               | 43.7                                     | 87.4                                   | 0.08                   | у траншеї        | 0.94                                   | АПвП-1(3□50)                                                                         | 195                                   | 243.45                                |
| 3 | Л-3         | ГПП-ТП3           | 1               | 38.3                                     |                                        | 1.155                  | у траншеї        | 0.94                                   | АПвП-1(3□50)                                                                         | 195                                   | 243.45                                |
| 4 | Л-4         | ГПП-ТП4           | 1               | 38.3                                     |                                        | 0.08                   | у траншеї        | 0.94                                   | АПвП-1(3□50)                                                                         | 195                                   | 243.45                                |
| 5 | Л-6         | ГПП-ТП6           | 1               | 38.3                                     |                                        | 1.19                   | у траншеї        | 0.94                                   | АПвП-1(3□50)                                                                         | 195                                   | 243.45                                |
| 6 | Л-9         | ГПП-ТП9           | 2               | 19.75                                    | 67.2                                   | 1.636                  | у траншеї        | 0.94                                   | АПвП-1(3□50)                                                                         | 195                                   | 243.45                                |
| 7 | Л-11        | ГПП-ТП11          | 1               | 38.3                                     |                                        | 2.1                    | у траншеї        | 0.94                                   | АПвП-1(3□50)                                                                         | 195                                   | 243.45                                |
| 8 | Л-13        | ГПП-ТП13          | 2               | 31.7                                     | 63.5                                   | 0.51                   | у траншеї        | 0.94                                   | АПвП-1(3□50)                                                                         | 195                                   | 243.45                                |

Таблиця 3.2 - Вибір перерізів кабельних ліній розподільної мережі 0,4 кВ

| №  | Номер лінії | Призначення лінії | Кількість ліній | Розрахункове навантаження на один кабель |                        | Марка і переріз кабелю, обраного за умовою допустимого нагріву $S$ , мм <sup>2</sup> | Допустиме навантаження на один кабель      |  |
|----|-------------|-------------------|-----------------|------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--|
|    |             |                   |                 | в нормальному режимі $I_p$ , А           | довжина лінії $l$ , км |                                                                                      | у нормальному режимі $I'_{\text{доп}}$ , А |  |
| 9  | КЛ2         | ТП3-ТП6           | 1               | 24.4                                     | 0.061                  | АПвП -1(4х5)                                                                         | 27                                         |  |
| 10 | КЛ3         | ТП6-ТП3           | 1               | 49.4                                     | 0.21                   | АПвП -1(4х16)                                                                        | 55                                         |  |
| 11 | КЛ5         | ТП6-РП5           | 1               | 5.7                                      | 0.27                   | АПвП -1(4х2,5)                                                                       | 19                                         |  |
| 12 | КЛ6         | ТП6-РП6           | 2               | 6.76                                     | 0.65                   | АПвП -1(4х2,5)                                                                       | 19                                         |  |
| 13 | КЛ7         | ТП6-РП7           | 2               | 5.14                                     | 0.114                  | АПвП -1(4х2,5)                                                                       | 19                                         |  |
| 14 | КЛ8         | ТП6-ТП8           | 1               | 8.7                                      | 0.123                  | АПвП -1(4х2,5)                                                                       | 19                                         |  |
| 15 | КЛ10        | ТП9-РП10          | 2               | 17.95                                    | 0.29                   | АПвП -1(4х3)                                                                         | 21                                         |  |
| 16 | КЛ12        | ТП11-РП12         | 1               | 15.6                                     | 0.14                   | АПвП -1(4х3)                                                                         | 21                                         |  |

### 3.3 Розрахунок струмів КЗ у мережі вище 1000 В

При проходженні струмів КЗ струмовими частинами електричних апаратів і установок, відбувається їх руйнування. У зв'язку з чим виникає необхідність розрахунку цих величин.

Необхідно всі розрахункові дані привести до базової напруги і базової потужності.

Величина базисної напруги перевищує номінальну на 5%. За базову потужність приймають будь-яке число кратне 10.

Для розрахунку струмів КЗ відповідно складається розрахункова схема - однолінійна спрощена схема електроустановки, в якій враховують всі джерела живлення (ПС енергосистеми, генератори ТЕЦ) трансформатори, повітряні та кабельні лінії.

Базові опори в відносних одиницях визначаються за такими формулами:

1. опір ПЛ та КЛ

$$r_{\delta^*} = r_0 \cdot l \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2};$$

$$x_{\delta^*} = x_0 \cdot l \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2},$$

2. Індуктивний опір силового трансформатора

$$x_{\delta^*} = \frac{U_{\kappa}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{н.тр}}.$$

При значній протяжності мережі (повітряної та кабельної) враховуються також їх активні опори. Вважається доцільно враховувати активний опір, якщо співвідношення між сумарними активними  $r_{\Sigma}$  та реактивними  $x_{\Sigma}$  опорами до місця КЗ такі:  $r_{\Sigma} > \frac{x_{\Sigma}}{3}$ .

Діюче значення встановленого струму КЗ:

$$I_{\kappa} = \frac{I_{\delta}}{Z_{\delta^*\Sigma}},$$

$$\text{де } I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3}U_{\delta}}$$

$$Z_{\delta^*\Sigma} = \sqrt{r_{\delta^*\Sigma}^2 + x_{\delta^*\Sigma}^2}$$

відповідно повний опір від джерела живлення до точки КЗ, виражений в відносних одиницях і приведений до базової потужності (якщо активний опір не враховується, то  $Z_{\delta^*\Sigma} = x_{\delta^*\Sigma}$ ).

Ударний струм короткого замикання:

$$i_y = I_{\kappa} \cdot \sqrt{2} \cdot K_{y\partial},$$

За величиною  $I_k$  перевіряють електричні апарати і струмопровідні частини. За величиною  $i_y$  перевіряються апарати на динамічну стійкість.

Для розрахунків струмів КЗ відповідно приймаємо базові величини:

Використовуючи стандартний ряд базових напруг, приймаємо  $U_{\phi 1}=37(\text{кВ})$ ,  $U_{\phi 2}=10,5(\text{кВ})$ .

За базову потужність, приймаємо  $S_{\phi}=630 \text{ (МВА)}$ .

Приймаємо, що потужність джерела електроенергії (енергосистеми) і відповідно індуктивний опір  $x_c=0$ .

Розрахунок струмів КЗ здійснюємо на ділянці «Система - ГПП - ТП - 3». Для цієї ділянки складаємо однолінійну розрахункову схему і схему заміщення, представлені на рис. 3.2 та рис. 3.3.

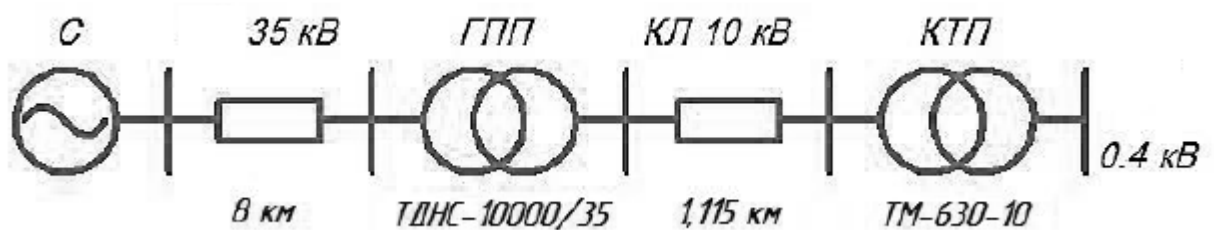


Рисунок 3.2 - Однолінійна розрахункова схема мережі

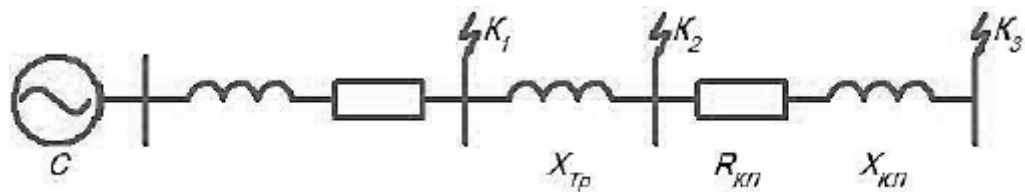


Рисунок 3.3 - Спрощена однолінійна СЗ

Для розрахунків струмів КЗ приймаємо базові величини:

$$S_{\phi}=630 \text{ МВА};$$

$$U_{\phi 1}=37 \text{ кВ},$$

$$U_{\delta 2}=10.5 \text{ кВ},$$

$$I_{\delta 1}=\frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 1}}=\frac{630}{\sqrt{3} \cdot 37}=9,83 \text{ кА}$$

$$I_{\delta 2}=\frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 2}}=\frac{630}{\sqrt{3} \cdot 10,5}=34,64 \text{ кА}$$

Вважаємо, що потужність системи  $S_c=\infty$ , відповідно індуктивний опір системи  $x_c=\frac{S_{\delta}}{S_c}=0$ .

Для генераторів, трансформаторів, високовольтих ліній зазвичай враховуються тільки індуктивні опори.

Базові опори в відносних одиницях визначаються за такими формулами:  
для повітряної лінії:

$$X_{*nl}=x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2}$$

де  $x_0=0,432 \text{ Ом}$ .

$$X_{*nl}=0,432 \cdot 8 \cdot \frac{630}{37^2}=1,59 \text{ у.о.}$$

$$R_{*nl}=r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 1}^2}$$

де  $r_0=0,422 \text{ Ом / км}$ .

$$R_{*nl}=0,422 \cdot 8 \cdot \frac{630}{37^2}=0,55 \text{ у.о.}$$

для трансформатора:

$$X_{*mp}=\frac{U_{\kappa \%}}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{н. mp}}$$

$$X_{*mp}=\frac{8}{100} \cdot \frac{630}{10}=5,04 \text{ у.о.}$$

для КЛ:

$$X_{*\kappa l}=x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta 2}^2}$$

де  $x_0=0,21 \text{ Ом/км}$  для перерізу жили –  $50 \text{ мм}^2$ .

$$X_{*кл} = \frac{0,21}{2} \cdot 1,155 \cdot \frac{630}{10,5^2} = 1,386 \text{ у.о.}$$

$$R_{*кл} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}2}^2}$$

$r_0$  – активний опір лінії на один км довжини, Ом/км,

$r_0 = 0,625$  Ом/км для перерізу жили –  $50 \text{ мм}^2$ .

$l$  – довжина лінії, км.

Для точки K1:

Опір короткого замикання:

так як  $r_{\Sigma} > \frac{x_{\Sigma}}{3}$  то потрібно враховувати активний опір ПЛ.

Опір короткого замикання:

$$z_{\Sigma K1} = \sqrt{X_{*нл}^2 + R_{*нл}^2},$$

$$z_{\Sigma K1} = 2,22.$$

Тоді діюче значення струму КЗ:

$$I_{K1} = \frac{I_{\bar{o}1}}{z_{\Sigma K1}},$$

$$I_{K1} = \frac{9,83}{2,22} = 4,42 \text{ кА}.$$

Ударний струм:

$$i_{y\bar{o}1} = \sqrt{2} \cdot k_{y\bar{o}} \cdot I_{K1},$$

де  $k_{y\bar{o}} = 1,25$

$$i_{y\bar{o}1} = \sqrt{2} \cdot 1,25 \cdot 4,42 = 7,82 \text{ кА},$$

Потужність короткого замикання:

$$S_{K1} = \frac{S_{\bar{o}}}{z_{\Sigma K1}}$$

$$S_{K1} = \frac{630}{2,22} = 283,36 \text{ МВА}.$$

Розглянемо точку K2:

Опір короткого замикання:

$$z_{\Sigma K2} = \sqrt{(X_{*nl} + X_{*mp})^2 + R_{*nl}^2} = 2,23 \text{ у.о.}$$

Тоді діюче значення струму КЗ:

$$I_{K2} = \frac{I_{\delta 2}}{z_{\Sigma K2}} = \frac{34,64}{2,23} = 15,56 \text{ кА}$$

Ударний струм:

$$i_{y\delta 2} = \sqrt{2} \cdot k_{y\delta} \cdot I_{K2} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 15,56 = 39,59 \text{ кА}$$

де  $k_{y\delta} = 1,8$  - ударний коефіцієнт.

Потужність короткого замикання:

$$S_{K2} = \frac{S_{\delta}}{z_{\Sigma K2}} = \frac{630}{2,23} = 282,9 \text{ МВА}$$

Розглянемо точку КЗ:

Опір короткого замикання:

$$z_{\Sigma K3} = \sqrt{(X_{*nl} + X_{*mp} + X_{*кл})^2 + (R_{*nl} + R_{*кл})^2} = 4,69 \text{ у.о.}$$

Тоді діюче значення струму КЗ:

$$I_{K3} = \frac{I_{\delta 2}}{z_{\Sigma K3}} = \frac{34,64}{4,69} = 7,39 \text{ кА}$$

Ударний струм:

$$i_{y\delta 3} = \sqrt{2} \cdot k_{y\delta} \cdot I_{K3} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 7,39 = 18,8 \text{ кА}$$

де  $k_{y\delta} = 1,8$ .

Потужність короткого замикання:

$$S_{K3} = \frac{S_{\delta}}{z_{\Sigma K3}} = \frac{630}{4,69} = 134,42 \text{ МВА}$$

Термічно стійкий переріз:

$$F_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C_T},$$

де  $B_k = I_k^2 (t_{\text{відк}} + T_a)$

$T_a = 0,05 \text{ с};$

$t_{\text{відк}} = t_z + t_{\text{г}}$



$$C_T = 85 \text{ A} \cdot \text{с}^{1/2} / \text{мм}^2.$$

Для вимикача типу ВБПЕ - 10 повний час відключення  $t_g = 0,05 \text{ с}$ .

Час дії основного захисту  $t_z = 0,01 \text{ с}$ .

Перевіряємо лінію ГПП - ТПЗ:

$$I_{кз} = 15,56 \text{ кА}$$

$$(t_{відк} + T_a) = 0,055 + 0,05 = 0,06 \text{ с},$$

$$F_{\min} = \frac{I_{кз} \sqrt{t_{відк} + T_a}}{C_T},$$

$$F_{\min} = \frac{\sqrt{(15,56 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,06}}{95} = 41,19 \text{ мм}^2.$$

Отримане значення мінімального перерізу показує, що обраний кабель, для даної ділянки розподільної мережі АПВП - (3×50) проходить перевірку на початку лінії.

Схема заводського електропостачання приведена в графічній частині.

### 3.4 Вибір високовольтного обладнання

Вибираємо ВВ / ТЕ – 10 – 10 / 630У2

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ}, I_{ном} = 630 \text{ А}, I_{ном.відк} = 31,5 \text{ кА}$$

Перевіряємо вимикач за такими умовами:

1) Номінальна напруга:

$$U_{вст} \leq U_{ном} (10 \text{ кВ} = 10 \text{ кВ})$$

2) Номінальний струм:

$$I_{ном} \leq I_{ном} (57,45 \text{ А} \leq 630 \text{ А})$$

$$I_{\max} = 2 \cdot I_{ном}$$

$$I_{\max} \leq I_{ном} (114,9 \text{ А} \leq 630 \text{ А})$$

3) Вимикаюча здатність:

$$I_{n,\tau} \leq I_{відк.ном} (4,42 \text{ кА} \leq 10 \text{ кА})$$

$$i_{a,\tau} \leq i_{a.ном} (1,88 \text{ кА} \leq 8,48 \text{ кА})$$

$$i_{a,ном} = \sqrt{2} \cdot \beta_n \cdot I_{відк.ном} / 100 = \sqrt{2} \cdot 60 \cdot 10 / 100 = 8,48 \text{ кА}$$

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot e^{\frac{-\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 4,42 \cdot e^{\frac{-0,06}{0,05}} = 1,88 \text{ кА},$$

де  $T_a = 0,05 \text{ с}$ ;

$$\tau = t_{p.з.} + t_{с.в.} = 0,01 + 0,05 = 0,06 \text{ с}.$$

4) Електродинамічна стійкість:

$$I_{n0} \leq I_{дин} (4,42 \text{ кА} \leq 12,5 \text{ кА})$$

$$i_y \leq i_{дин} (7,82 \text{ кА} \leq 32 \text{ кА}),$$

5) Термічна стійкість:

$$B_\kappa \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм} (3,52 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 300 \text{ кА}^2 \cdot \text{с})$$

$$I_{терм}^2 \cdot t_{терм} = 10^2 \cdot 3 = 300 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

$$B_\kappa = I_{n0}^2 \cdot \tau = 4,42^2 \cdot 0,18 = 3,52 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

де  $\tau = t_{p.з.} + t_{відк.в.} + T_a = 0,08 + 0,05 + 0,05 = 0,18 \text{ с}$

Вибір ТС.

Вибираємо  $ТОЛ-10-1$ .

$$U_{ном} = 10 \text{ кВ}, I_{ном}^1 = 150 \text{ А}, I_{ном}^2 = 5 \text{ А}$$

Перевіряємо ТС:

1)  $U_H$ :

$$U_{вст} \leq U_{ном} (10 \text{ кВ} \leq 10 \text{ кВ})$$

2)  $I_H$ :

$$I_{норм} \leq I_{ном} (57,45 \text{ А} \leq 150 \text{ А})$$

$$I_{max} \leq I_{ном} (114,9 \text{ А} \leq 150 \text{ А})$$

3) Електродинамічна стійкість:

$$i_y \leq i_{дин} (7,82 \text{ кА} \leq 17,6 \text{ кА})$$

4) Термічна стійкість:

$$B_\kappa \leq I_{терм}^2 \cdot t_{терм} (3,52 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \leq 300 \text{ кА}^2 \cdot \text{с})$$

$$I_{терм}^2 \cdot t_{терм} = 10^2 \cdot 3 = 300 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$$

Вибір високовольтних вимірювальних приладів наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Вибір вимірювальних приладів

| Назва приладу                 | Тип приладу | Навантаження фази, ВА, |   |     |
|-------------------------------|-------------|------------------------|---|-----|
|                               |             | A                      | B | C   |
| Амперметри                    | Е-365       | 0.5                    | - | -   |
| Ватметри                      | Д-335       | 0.5                    | - | 0.5 |
| Лічильники активної енергії   | СА3-І674    | 2.5                    | - | 2.5 |
| Лічильники реактивної енергії | СР4-І676    | 2.5                    | - | 2.5 |
| Разом                         |             | 6                      | - | 5.5 |

Загальне опір приладів:

$$r_{\text{прил}} = \frac{S_{\text{прил}}}{I_2^2} = \frac{6}{5^2} = 0.24 \text{ Ом}$$

Опір контактів  $r_{\kappa} = 0.1 \text{ Ом}$  при загальному числі приладів більше трьох;

$$z_{2\text{ном}} = 0.8 \text{ Ом}.$$

Допустимий опір проводів:

$$r_{\text{пр}} = z_{2\text{ном}} - r_{\text{прил}} - r_{\kappa} = 0.8 - 0.24 - 0.1 = 0.46 \text{ Ом}.$$

Довжина проводів  $l_{\text{розр}} = \sqrt{3} \cdot 5 = 8.66$ ,  $l = 5 \text{ м}$ .

Переріз проводів:

$$q = \frac{\rho \cdot l}{r_{\text{пр}}} = \frac{0.0283 \cdot 8.66}{0.46} = 0.533 \text{ мм}^2.$$

$$\rho = 0.0283 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}.$$

Приймаємо кабель АКРВГ із перерізом жил -  $4 \text{ мм}^2$ .

ТН:

Вибираємо ЗНОЛ.09.

$$U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}, U_{\text{ном}}^1 = 10000 / \sqrt{3} \text{ В}, U_{\text{ном}}^{2\text{осн.стор}} = 100 / \sqrt{3} \text{ В},$$

$$U_{\text{ном}}^{2\text{дод.стор}} = 100 \text{ В}$$

Перевіряємо ТН:

1)  $U_{\text{н}}$ :



### 3.5 Розподіл приймачів по пунктах живлення

Вибрано радіальну схему мережі. Спосіб прокладання мережі живлення цеху - у каналах (графічна частина).

### 3.6 Вибір і перевірка електричних апаратів і струмоведучих частин в електричній мережі до 1000 В

Умови вибору АВ:

$$1. I_{н.розч} \geq I_{тр}$$

$$I_{тр} = I_{ном} - \text{для окремих електроприймачів,}$$

$$I_{тр} = I_p - \text{для групи електроприймачів.}$$

$$2. I_{кз} \geq 1,5 \cdot I_{пуск} - \text{для окремих електроприймачів,}$$

$$I_{кз} \geq 1,25 \cdot I_{пуск} - \text{для групи електроприймачів,}$$

$$I_{кз} = k \cdot I_{н.розч}.$$

*Розглянемо приклад розрахунку:*

АВ на окремі ЕП (Зарядний пристрій)

Вибираємо автомат серії ВА51-26,

$$I_{ном} = \frac{15}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,8} = 28,49 \text{ A};$$

Далі визначаємо умови вибору:

$$I_{н.розч} = 32 \geq I_{тр} = 28,49 \text{ A}$$

$$I_{пуск} = 5 \cdot I_{ном} = 5 \cdot 28,49 = 142,45 \text{ A}$$

$$I_{кз} = 224 \geq 1,5 \cdot 142,45 = 213,68 \text{ A}$$

$$224 \geq 213,68$$

Вибираємо автомат ВА57-35-31,5.

$$I_{ном.авт} = 32 \text{ A, номінальний струм розчеплювача } I_{н.розч} = 31,5 \text{ A, вставка}$$

миттєвого спрацювання  $I_{кз} = 252 \text{ A}$ . Зведемо дані в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Вибір захисних апаратів для ЕП цеху

| Номер по<br>плану цеху | Назва виробничого<br>механізму       | Р <sub>ном</sub> | I <sub>ном</sub> | 1,5I <sub>пуск</sub> | Тип<br>вимикача | I <sub>т.розч</sub> | I <sub>е.розр</sub> |
|------------------------|--------------------------------------|------------------|------------------|----------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
|                        |                                      | кВт              | А                | А                    |                 |                     |                     |
| ПР1                    |                                      |                  |                  |                      |                 |                     |                     |
| 1                      | Зварювальний<br>трансформатор        | 20               | 86,8             | 651,15               | ВА51-35         | 100                 | 800                 |
| 2,4                    | Зарядний пристрій,                   | 15               | 28,49            | 213,65               | ВА51-35         | 31,5                | 252                 |
| 3                      | Зварювальний<br>трансформатор ПВ=40% | 12,6             | 47,86            | 358,94               | ВА51-35         | 50                  | 400                 |
| 9                      | Кран-балка                           | 30               | 95,95            | 719                  | ВА51-35         | 100                 | 800                 |
| 5-8                    | Домкрат                              | 15               | 30,96            | 232,23               | ВА51-35         | 31,5                | 252                 |
| 62                     | Вентилятор                           | 20               | 56,27            | 422,04               | ВА51-35         | 63                  | 504                 |
| ПР2                    |                                      |                  |                  |                      |                 |                     |                     |
| 10-11                  | Механічний прес                      | 3,5              | 10,23            | 76,7                 | ВА51-31         | 12,5                | 93,75               |
| 12                     | Свердлильний верстат                 | 2                | 8,9              | 65,1                 | ВА51-31         | 12,5                | 93,75               |
| 13                     | Точильний верстат                    | 5,5              | 20,89            | 156,9                | ВА51-31         | 25                  | 187,5               |
| 14                     | Випрямляч                            | 8                | 20,35            | 151,9                | ВА51-31         | 25                  | 187,5               |
| 15-17                  | Зварювальний<br>трансформатор        | 20               | 86,82            | 651,15               | ВА51-31         | 100                 | 750                 |
| 18                     | Вертикально-свердлильний<br>верстат  | 5                | 18,99            | 142,44               | ВА51-31         | 25                  | 187,5               |
| 67                     | Вентилятор                           | 7,5              | 21,1             | 158.26               | ВА51-31         | 25                  | 187,5               |
| ПР3                    |                                      |                  |                  |                      |                 |                     |                     |
| 19,20                  | Верстати                             | 3                | 13,02            | 97,67                | ВА51-26         | 15                  | 105                 |
| 21                     | Прес фікційний                       | 10               | 28,22            | 219,14               | ВА51-26         | 32                  | 224                 |
| 22                     | Випробувальний стенд                 | 5,5              | 11,94            | 89,53                | ВА51-26         | 15                  | 105                 |
| 26-27                  | Муфельна піч                         | 15               | 23,99            | 179,9                | ВА51-26         | 32                  | 224                 |
| ПР4                    |                                      |                  |                  |                      |                 |                     |                     |
| 23-25                  | Випробувальний стенд                 | 5,5              | 11,94            | 89,53                | ВА51-31         | 16                  | 120                 |
| 29-30                  | Буряковий трансформатор              | 20               | 86,82            | 651,15               | ВА51-31         | 100                 | 750                 |
| 63                     | Вентилятор                           | 20               | 56,27            | 422,04               | ВА51-31         | 63                  | 472,2               |

|                 |                                 |     |       |        |         |     |       |
|-----------------|---------------------------------|-----|-------|--------|---------|-----|-------|
| ПР5             |                                 |     |       |        |         |     |       |
| 31,37           | Кран-балка                      | 10  | 23,99 | 179,92 | BA51-31 | 25  | 187,5 |
| 32              | Кран-балка                      | 7,5 | 31,98 | 239,89 | BA51-31 | 63  | 472,5 |
| 33              | Вертикально-свердильний верстат | 5   | 21,7  | 162,79 | BA51-31 | 25  | 187,5 |
| 34              | Буряковий трансформатор         | 20  | 86,82 | 651,15 | BA51-31 | 100 | 750   |
| 35-36           | Фрезерувальний верстат          | 3   | 13,02 | 97,67  | BA51-31 | 16  | 120   |
| 38              | Випрямляч                       | 20  | 50,64 | 379,83 | BA51-31 | 63  | 472,5 |
| ПР6             |                                 |     |       |        |         |     |       |
| 39              | Координатно-розточний верстат   | 22  | 95,5  | 716,26 | BA51-31 | 100 | 750   |
| 40,41,<br>44-46 | Верстати                        | 7,5 | 32,56 | 244,18 | BA51-31 | 63  | 472,5 |
| 47              | Точильний верстат               | 5,5 | 23,87 | 179,07 | BA51-31 | 25  | 187,5 |
| 48              | Токарний верстат                | 15  | 65,11 | 488,36 | BA51-31 | 80  | 520   |
| 66              | Вентилятор                      | 7,5 | 21,1  | 158,3  | BA51-31 | 25  | 187,5 |
| ПР7             |                                 |     |       |        |         |     |       |
| 49-50           | Гідравлічний прес               | 15  | 43,83 | 328,7  | BA51-31 | 63  | 472,5 |
| 51              | Зварювальний трансформатор      | 20  | 86,82 | 651,15 | BA51-31 | 100 | 750   |
| 52              | Кран-балка                      | 15  | 65,11 | 488,36 | BA51-31 | 80  | 520   |
| 53              | Зварювальний трансформатор      | 10  | 43,41 | 325,57 | BA51-31 | 63  | 472,5 |
| 54              | Електромот                      | 20  | 54,26 | 406,97 | BA51-31 | 63  | 472,5 |
| 55              | Електропід                      | 30  | 47,97 | 359,84 | BA51-31 | 63  | 472,5 |
| 56-57           | Вентилятор горна                | 15  | 28,22 | 211,67 | BA51-31 | 31  | 323,5 |
| 68-69           | Вентилятор                      | 7,5 | 21,1  | 158,3  | BA51-31 | 25  | 187,5 |
| ПР8             |                                 |     |       |        |         |     |       |
| 58-59           | Кран-балка                      | 10  | 23,99 | 179,92 | BA51-31 | 25  | 187,5 |
| 60,61           | Токарний верстат                | 15  | 65,11 | 488,36 | BA51-31 | 80  | 520   |
| 70              | Вентилятор                      | 7,5 | 21,1  | 158,3  | BA51-31 | 25  | 187,5 |

За даними табл. 3.5 приймемо типи розділових шаф. Результати зведені в табл. 3.6

Таблиця 3.6 – Розподільчі шафи та пункти цеху

| № шафи | Тип шафи | Число відходящих ліній |
|--------|----------|------------------------|
| ПР-1   | ПР8503   | 12                     |
| ПР-2   | ПР8503   | 12                     |
| ПР-3   | ПР8503   | 8                      |
| ПР-4   | ПР8503   | 8                      |
| ПР-5   | ПР8503   | 12                     |
| ПР-6   | ПР8503   | 12                     |
| ПР-7   | ПР8503   | 12                     |
| ПР-8   | ПР8503   | 8                      |

Виберемо автоматичні вимикачі для захисту ліній, які живлять РШ цеху.

Умови вибору автоматичних вимикачів:

$$1) I_{н.розч} \geq I_{тр}$$

$$2) I_{кз} \geq 1,25 \cdot I_{кр},$$

де  $I_{тр}$  - тривало протікаючий в лінії струм;

*Приклад вибору АВ для захисту ПР-1:*

Піковий струм шафи  $I_{нік}$ , який визначаємо по формулі:

$$I_{нік} = I_{пуск.макс} + (I_p - I_{ном.м} \cdot K_v)$$

де  $I_{пуск.макс}$ ,  $I_{ном.м}$ ,  $K_v$  - відповідно найбільший з пускових струмів двигунів

в групі за паспортними даними, його номінальний (приведений до ПВ = 100%) струм і коефіцієнт використання;

Звідси

$$I_{кр} = I_{нік} = (456,34 + 208,99) = 665,34 \text{ А}$$

Умови для вибору АВ:

$$I_{н.розч} \geq I_{тр},$$

$$250 \geq 214,48$$

$$I_{кз} \geq 1,25 \cdot I_{кр} = 1,25 \cdot 665,34 = 831,68 \text{ А},$$

Приймаємо АВ типу  $BA57-35$  з  $I_{н.розч} = 250 \text{ А}$ .



$$I_{кз} = 1000 \text{ A}.$$

Результати вибору автоматичних вимикачів для захисту розподільних шаф приведені в таблицю. 3.7.

Таблиця 3.7 – Апарати захисту

| Номера шаф | $I_{тр}$ | $I_{кр}$ | $1,25 I_{кр}$ | Тип АВ  | $I_{н.розч}$ | $I_{кз}$ |
|------------|----------|----------|---------------|---------|--------------|----------|
| ПР1        | 214.47   | 665.34   | 831.68        | ВА57-35 | 250          | 1000     |
| ПР2        | 132.31   | 545,2    | 681,5         | ВА57-35 | 160          | 800      |
| ПР3        | 56,021   | 164,11   | 295.13        | ВА57-35 | 63           | 315      |
| ПР4        | 126,864  | 539,74   | 674,67        | ВА57-35 | 160          | 800      |
| ПР5        | 108,68   | 346,99   | 433.74        | ВА57-35 | 125          | 500      |
| ПР6        | 84,91    | 411,53   | 514.41        | ВА57-35 | 100          | 600      |
| ПР7        | 194,07   | 398,22   | 497,77        | ВА57-35 | 200          | 500      |
| ПР8        | 46,62    | 269,32   | 336,65        | ВА57-35 | 100          | 600      |

Вибір ввідного АВ на ТП-3:

$$I_{тр} = I_{ном.тр} = \frac{S_{ном.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{630}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 957,19 \text{ A}$$

$$I_{пик}^{ПС} = I_{пуск.макс} + (I_{ном.тр} - K_v \cdot I_{ном.м}) =$$

$$= 66,34 + (957,19 - 0,32 \cdot 132,31) = 1518,19 \text{ A}.$$

Приймаємо АВ типу ВА83 – 41 з  $I_{н.розч} = 1000 \text{ A}$ .

$$I_{кз} = 2 \cdot I_{ном.розч} = 2 \cdot 1000 = 2000 \text{ A}.$$

### 3.7 Вибір перерізів ліній ЕМ живлення цеху.

Проводиться за умовою:

$$I_{дон} \geq \frac{I_{м}}{k_{прокл}}.$$

Перерізи провідників має бути узгоджені з апаратом захисту для цього провідника :

$$I_{\text{дон}} \geq \frac{k_3 \cdot I_3}{k_{\text{прокл}}}$$

Перевірка обраного перерізу провідника:

$$\Delta U_{p\%} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{10 \cdot U_n^2} \leq \Delta U_{\text{дон}\%} = 5\%,$$

де  $\Delta U_{\text{дон}\%} = 5\%$ .

Результати розрахунків наведемо у таблиці 3.8.

*Приклад розрахунку для лінії РПЗ - ПРЗ:*

$$I_{\text{дон}} \geq \frac{I_M}{k_{\text{прокл}}} = \frac{56,02}{1} = 56,02 \text{ A},$$

де  $k_{\text{прокл}} = 1$  при способі прокладки кабелю каналам.

$$I_{\text{дон}} \geq \frac{k_3 \cdot I_3}{k_{\text{прокл}}} = \frac{1 \cdot 63}{1} = 63 \text{ A}.$$

де  $I_3 = I_{\text{ном.розч}} = 63 \text{ A}$ ,  $k_3 = 1$ .

Вибираємо переріз кабелю, що задовольняє обом умовам. Приймаємо кабель марки АБВГ 4 (1х25):  $I_{\text{дон}} = 70 \text{ A}$ .

Перевіряємо:

$$\begin{aligned} \Delta U_{p\%} &= \frac{P \cdot l \cdot r_0 + Q \cdot l \cdot x_0}{10 \cdot 0.4^2} = \\ &= \frac{34.97 \cdot 1.25 \cdot 0.0799 + 11.54 \cdot 0.091 \cdot 0.0799}{10 \cdot 0.4^2} = 2.2\% \end{aligned}$$

Кінцево прийнятий переріз і марка кабелю: АБВГ 4 (1х25).

Таблиця 3.8 - Вибір перерізів ліній ЕМ живлення цеху

| Номер<br>п/п | Призначення ділянки (лінії) мережі живлення | Розрахункове навантаження $S_p$ , кВА | Розрахунковий струм $I_p$ , А | Довжина лінії $l$ , км | Спосіб прокладки | Коефіцієнт прокладання, К | Марка кабеля | Перерізи, обрані з умови допустимого нагріву<br>$S_{нз}$ , мм <sup>2</sup> | Допустимий тривалий струм, А |
|--------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------|---------------------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| 1.           | ПР1                                         | 140.9                                 | 214.47                        | 0.125                  | У<br>каналі      | 1                         | АВВГ         | 1(4x70)                                                                    | 280                          |
| 2.           | ПР2                                         | 86.98                                 | 132,31                        | 0.0973                 | У<br>каналі      | 1                         | АВВГ         | 1(4x95)                                                                    | 175                          |
| 3.           | ПР3                                         | 36.83                                 | 56,021                        | 0.0799                 | У<br>каналі      | 1                         | АВВГ         | 1(4x25)                                                                    | 70                           |
| 4.           | ПР4                                         | 83.4                                  | 126,864                       | 0.054                  | У<br>каналі      | 1                         | АВВГ         | 1(4x95)                                                                    | 175                          |
| 5.           | ПР5                                         | 71.44                                 | 108,68                        | 0.056                  | У<br>каналі      | 1                         | АВВГ         | 1(4x70)                                                                    | 140                          |
| 6.           | ПР6                                         | 55.82                                 | 84,91                         | 0.133                  | У<br>каналі      | 1                         | АВВГ         | 1(4x50)                                                                    | 120                          |
| 7.           | ПР7                                         | 127.58                                | 194,07                        | 0.19                   | У<br>каналі      | 1                         | АВВГ         | 1(4x50)                                                                    | 240                          |
| 8.           | ПР8                                         | 30.65                                 | 46,62                         | 0.218                  | У<br>каналі      | 1                         | АВВГ         | 1(4x25)                                                                    | 70                           |

### **3.8 Вибір перерізів розподільчої мережі цеху**

Вибір перерізів розподільчої мережі цеху показано в Додатку Б.

### **3.9 Розрахунок мережі живлення та розподільчої мережі за умовами допустимої втрати напруги. Побудова епюри відхилень напруги**

Розрахунок мережі живлення та розподільчої мережі за умовами допустимої втрати напруги та побудова епюри відхилень напруги показано в Додатку В.

### **3.10 Розрахунок струмів КЗ в мережі до 1 кВ**

Розрахунок струмів КЗ в мережі до 1 кВ показано у Додатку Г.

### **3.11 Побудова карти селективності дії електричних апаратів захисту для ділянки ЦМ**

Побудова карти селективності дії електричних апаратів захисту для ділянки ЦМ показано в Додатку Д.

### **3.12 Висновки до розділу**

1. Розроблено схему зовнішнього електропостачання підприємства від підстанції енергосистеми напругою 35 кВ із застосуванням двох радіальних повітряних ліній, що забезпечує необхідний рівень резервування. Обґрунтовано розміщення головної понижаючої підстанції (ГПП) на території підприємства та вибір двох силових трансформаторів типу ТДНС-10000/35, що відповідають розрахунковому навантаженню і режимам роботи мережі.

2. Для внутрішньозаводської електричної мережі 10 кВ застосовано радіальну схему з кабельними лініями з ізоляцією зі зшитого поліетилену.

Виконано вибір перерізів кабелів за економічною густиною струму та умовами допустимого нагріву в нормальному і післяаварійному режимі. Підтверджено, що обрані перерізи кабелів забезпечують надійну роботу у мережі без перевищення допустимих струмів.

3. Проведено розрахунок струмів КЗ у мережі вище 1000 В для характерних точок схеми. За отриманими значеннями виконано перевірку термічної та електродинамічної стійкості кабельних ліній і електрообладнання, що підтвердило правильність прийнятих технічних рішень. На основі результатів розрахунків обрано високовольтні вимикачі, трансформатори струму та напруги, а також вимірювальні прилади, які задовольняють вимоги по номінальних параметрах і стійкості до струмів КЗ.

4. У мережі до 1000 В здійснено розподіл електроприймачів по пунктах живлення, вибір розподільчих шаф та АВ для захисту окремих електричних приймачів, групових ліній та вводів. Перевірено узгодження апаратів захисту з перерізами провідників, що забезпечує селективність, надійний захист від перевантажень і коротких замикань.

5. Виконано вибір перерізів ліній живлення цеху та розподільчої мережі, а також розрахунок мереж за умовами допустимих втрат напруги. Побудовано епюру відхилень напруги та карту селективності дії апаратів захисту, що підтверджує відповідність проекрованої системи чинним нормативним вимогам.

6. У цілому прийняті схемні та конструктивні рішення забезпечують надійне, безпечне та економічно доцільне електропостачання локомотивного депо і створюють умови для стабільної роботи електрообладнання в нормальних, післяаварійних та аварійних режимах.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1. Розподіл травм за ступенем тяжкості

Визначення ступеню тяжкості травм, отриманих на виробництві, проводиться з метою віднесення нещасних випадків до таких, що спричинили тяжкі наслідки, у тому числі з можливою інвалідністю потерпілого. Відповідно до “Порядку розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві” за рішенням органів державного нагляду за охороною праці підлягають спеціальному розслідуванню.

1. Кваліфікуючими ознаками тяжкості травм, отриманих в результаті нещасних випадків на виробництві, є характер отриманих ушкоджень, ускладнення та наслідки, пов’язані з цими ушкодженнями.

2. За ознаками тяжкості травми розподіляються на дві категорії: тяжкі і легкі.

3. До тяжких травм відносяться:

3.1 за характером отриманих ушкоджень:

- відкрита проникаюча черепно-мозкова;
- перелом черепа;
- внутрішньочерепна травма важкого і середньо-важкого ступеню тяжкості;
- поранення, проникаючі у просвіт горла, гортані, трахеї, стравоходу, а також ушкодження щитоподібної та вилочкової залоз;
- проникаючі поранення хребта;
- ушкодження хребців шийного відділу, хребта, у тому числі і без порушення функції спинного мозку;
- нестабільні ушкодження грудних або поперекових хребців;
- закриті ушкодження спинного мозку;

- поранення грудної клітки, що проникають у плевральну порожнину, також порожнину кліткового середостіння, зокрема без ушкодження внутрішніх органів;

- поранення живота, що проникають у порожнину очеревини;

- поранення, що проникають в порожнину сечового міхура або кишечника;

- відкриті поранення органів за очеревинного простору (нирок, підшлункової залози);

- розрив внутрішнього органу грудної або черевної порожнини, або порожнини таза, заочеревинного простору, розриви діафрагми, розриви передміхурової залози, розрив сечоводу;

- переломи заднього напівкільця таза;

- закриті та відкриті переломи довгих кісток, кінцівок;

- ушкодження крупних кровоносних судин;

- термічні (хімічні) опіки;

- електротермічні ураження;

- відмороження III—IV ступеня, загальне охолодження організму;

- радіаційні ураження середнього і важкого ступеня важкості;

- переривання вагітності;

- ушкодження периферичної нервової системи з функціональним порушенням;

- травми органу зору, що супроводжується порушенням зору.

### 3.2 Травми, що супроводжуються:

- шоком будь-якого ступеня тяжкості і будь-якого генезу;

- комою різкої етіології;

- гострими серцевою, судинною, печінковою, нирковою, дихальною недостатністю;

- розладом раціонального і органного кровообігу, що призводить до інфаркту внутрішніх органів, гангрени кінцівок та інше;

- сепсисом.

### 3.3 Травми, які призвели до тяжких наслідків:

- втрата зору, слуху, мови;
- втрата будь-якого органу або повна втрата його функцій;
- психічні розлади;
- втрата репродуктивної здатності;
- невивірне понівечення обличчя.

### 4. До легких травм відносяться:

- ушкодження, що не вказані в п. 3;
- розлади здоров'я з тимчасовою втратою працездатності тривалістю до 60 днів.

Медичні працівники, що надають особі, яка постраждала, першу медичну допомогу не видають висновку про тяжкість ушкодження. До їх компетенції належить визначення характеру подальшого лікування потерпілого (амбулаторне або стаціонарне), а також констатація летального результату.

Медичний висновок про ступінь тяжкості виробничої травми дають на запит роботодавця та/або голови комісії з розслідування нещасного випадку на виробництві лікарсько-експертні комісії (ЛКК) лікувально-профілактичного закладу, де здійснюється лікування особи, що постраждала, в строк до 1 доби з моменту надходження запиту.

## **4.2 Основні причини виробничих травм та професійних захворювань**

Виробничі травми та професійні захворювання поділяються на такі основні групи: організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні, психофізіологічні, економічні.

До організаційних причин відносяться: відсутність або неякісне проведення навчання та інструктажів з охорони праці; порушення правил, стандартів, норм, вимог інструкцій, технологічних регламентів, правил експлуатації устаткування, транспортних засобів, інструменту; недостатній



технічний нагляд та контроль (або його відсутність) за небезпечними роботами; невиконання заходів з охорони праці.

Технічні причини: неспрацьованість виробничого устаткування; недосконалість виробничих процесів; конструктивні недоліки устаткування; відсутність або недосконалість технічних засобів безпеки та інше.

Санітарно-гігієнічні причини: підвищений (вище гранично допустимої концентрації) вміст у повітрі робочої зони шкідливих речовин; підвищені рівні шуму та вібрації; недостатнє освітлення робочих місць; несприятливі параметри мікроклімату; наявність шкідливих та небезпечних випромінювань; порушення правил особистої гігієни.

Психофізіологічні причини: монотонність праці; помилкові дії оператора внаслідок втоми через надмірну важкість виконуваної роботи; напруженість праці; необережність; невідповідність антропометричних або психофізіологічних параметрів оператора використовуваній техніці; незадоволення працею; несприятливий психофізіологічний клімат у колективі.

Економічні: низький заробіток; порушення економічних методів стимулювання праці.

#### **4.3 Інженерні заходи захисту населення та персоналу об'єктів енергетики. Організація укриття у мирний та воєнний час.**

Враховуючи особливу важливість забезпечення захисту і життєдіяльності населення в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу, розглянемо більш докладно такі способи захисту і засоби їх забезпечення:

- укриття населення в захисних спорудах;
- евакуація населення;
- засоби індивідуального захисту, медичні засоби захисту та їх застосування.

Укриття в захисних спорудах — основний і найбільш надійний спосіб захисту від усіх вражаючих факторів. Цей спосіб передбачає застосування

системи захисних споруд, які відповідають можливому характеру обстановки і вимогам захисту різних категорій населення.

Систему захисних споруд становлять сховища в категорійованих містах і на найважливіших об'єктах господарювання, протирадіаційні укриття (ПРУ) у некатегорійованих містах і сільській місцевості, а також пристосовані для цієї мети метрополітени, підземні гірничі виробки, природні пустоти, найпростіші укриття у вигляді відкритих і перекритих щілин. Найважливішими напрямками в підвищенні надійності захисту є завчасне розгортання будівництва захисних споруд з метою забезпечення ними всього населення.

Будівництво і нагромадження фонду захисних споруд, а також пристосування і використання для укриття населення різних будинків і споруд, підвальних й інших заглиблених приміщень, метрополітенів, гірничих виробок і природних пустот є найважливішими інженерно-технічними заходами Цивільної оборони (ІТЗ ЦО) по створенню матеріальної бази для організації захисту населення в надзвичайних ситуаціях мирного і воєнного часу.

Відповідно до вимог «Норм проектування ІТЗ ЦО» усі захисні споруди повинні використовуватися в мирний час для потреб народного господарства й обслуговування населення, що істотно підвищує ефективність капітальних вкладень. Вони можуть використовуватися під приміщення: культурного і санітарно-побутового обслуговування населення (навчальні кабінети, гардероби, душові); виробничі — у тих випадках, якщо технологічні процеси не супроводжуються виділенням шкідливих для людей парів і газів і не вимагають природного освітлення; торгівлі і суспільного харчування; об'єктів спортивного призначення; складів різного призначення; гаражів для автомобілів тощо.

Сховищами називають захисні споруди герметичного типу, які забезпечують колективний захист від дії вражаючих факторів сучасної зброї, від впливу високих температур і продуктів горіння при пожежах, від ОР і СДОР, від радіоактивних речовин і біологічних засобів. Вони повинні забезпечувати надійне укриття людей щонайменше протягом двох діб. Захист людей від впливу ударної хвилі забезпечується міцними загороджувальними

конструкціями і установкою противибухових пристроїв у системі вентиляції; захист від отруйних речовин, радіоактивного пилю і біологічних засобів досягається шляхом оснащення системи фільтровентиляції спеціальним устаткуванням (протипиловими фільтрами, фільтрами-поглиначами).

#### **4.4 Дія електричного струму на персонал, що експлуатує об'єкти енергетики. Перша допомога при електротравмах**

Небезпека ураження струмом може чекати людину як вдома, так і на вулиці. Виявити пошкоджений або оголений провід, що знаходиться під напругою дуже важко – ні за звуком, ні за запахом, ні візуально провід під напругою не відрізняється від того, який не заживлений у мережі. Тому вкрай необхідно пам'ятати правила електробезпеки, щоб уникнути травматизму.

Людина, яка піддається дії струму, не може покликати на допомогу та самотійно звільнитись від предмету, через який її ударило струмом. Дотик до струмопровідних частин у більшості випадків призводить до судом м'язів, які обмежують здатність рухатись чи говорити. Як правило, про те, що людина у небезпеці свідчить її несподіване падіння на вулиці або неприродне відкидання від джерела струму невидимою силою, раптова втрата свідомості, судоми, яскраво виражене мимовільне скорочення м'язів, опіки на тілі з різко окресленими межами.

При ураженні електричним струмом в першу чергу потрібно звільнити потерпілого від струмопровідних частин обладнання. Необхідно швидко відключити від мережі ту частину електрообладнання, до якої доторкається людина. Будь-яке зволікання при наданні допомоги призводить до загибелі людини, яка знаходиться під дією струму. При звільненні потерпілих від струмопровідних частин або проводу вимикають струм, використовуючи сухий одяг, палицю, дошку, шапку, сухі рукавиці, рукав одягу, діелектричні рукавиці. Провідники перерізають інструментом з ізольованими ручками, перерубують сокирою з дерев'яним сухим топорищем.

Потерпілого можна відтягнути від струмопровідних частин за сухий одяг. При цьому, людина, яка відтягує потерпілого повинна уникати дотику до навколишніх металевих предметів та до відкритих частин тіла потерпілого. Відтягуючи потерпілого за ноги, не можна торкатися його взуття, оскільки воно може бути сирым і стає провідником електричного струму. Той, хто надає допомогу, повинен одягнути діелектричні рукавиці або обмотати руки шарфом, натягнути на них рукав піджака або пальта. Можна також ізолювати себе, ставши на гумовий килимок, суху дошку тощо.

Після звільнення потерпілого від дії струму потрібно відразу ж надати йому першу медичну допомогу.

Негайно сповістіть службу екстреної медичної допомоги.

Почніть серцево-легеневу реанімацію у будь-якої людини, що не подає ознак життя.

Якісний непрямий масаж серця (якомога швидше починайте виконувати непрямий масаж серця, виконуйте натискання у нижній половині грудини («в центрі грудної клітки»)), натискайте на глибину не менше 5, але не більше 6 см, натискайте на грудну клітку зі швидкістю 100–120 натисків/хв з якомога меншою кількістю переривань, дайте грудній клітці повністю випрямитися після кожного стиснення; не спирайтеся на груди (грудну клітку); виконуйте натискання на грудну клітку на твердій поверхні.

Штучне дихання (чергуйте 30 натискань та 2 вдихи; якщо ви не можете забезпечити штучну вентиляцію легень, виконуйте безперервне натискання на грудну клітку).

Автоматичний зовнішній дефібрилятор (як тільки АЗД надійде (буде доступний), або якщо такий вже є на місці, де наявний постраждалий з зупинкою серця, увімкніть його; прикріпіть електродні прокладки (наліпки) до оголеної грудної клітки постраждалого відповідно до положення, вказаного на АЗД або на прокладках (наліпках); дотримуйтесь голосових (та/або візуальних) підказок АЗД).

Лікаря необхідно викликати незалежно від того чи притомний потерпілий. Номер телефону швидкої допомоги – 103. Якщо потерпілий після звільнення від дії електричного струму і надання медичної допомоги прийшов до тями, його не слід самого відпускати додому. Над таким потерпілим встановлюють спостереження у лікарні, так як наслідки від впливу електричного струму можуть проявитися через кілька годин і призвести до більш важких наслідків.

Комплекс цих заходів, виконаних вчасно та якісно, дозволить врятувати життя людині, яку вразило струмом. Але краще все таки не допускати ураження струмом. Для цього важливо пам'ятати, що краще триматись осторонь електрообладнання та ліній електропередач у дощову погоду, не намагатись самотійно ремонтувати домашню електромережу, не користуватися зламаними електроприладами.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Виконано комплексне дослідження електричних навантажень локомотивного депо в цілому та цеху по ремонту електровозів зокрема, що дозволило обґрунтувати основні технічні рішення з побудови системи електропостачання підприємствах.

2. На основі вихідних даних та довідникових коефіцієнтів визначено розрахункові активні, реактивні та повні навантаження цеху по ремонту електровозів із урахуванням режимів роботи електроприймачів і освітлювального навантаження. Отримані значення розрахункових струмів створюють основу для подальшого вибору перерізів кабельних ліній, комутаційної та захисної апаратури.

3. Виконано розрахунки електричних навантажень підприємства у цілому, що дало змогу оцінити сумарні потужності, необхідні для вибору трансформаторів, розподільних мереж та обладнання головної понижаючої підстанції. Побудова картограми навантажень і визначення центру електричних навантажень дозволили раціонально розмістити цехові трансформаторні підстанції та ГПП з мінімізацією втрат електроенергії та довжин ліній живлення.

4. На підставі розрахованої густини навантаження обґрунтовано вибір кількості та номінальної потужності трансформаторів цехових підстанцій, забезпечивши допустимі коефіцієнти їх завантаження для споживачів різних категорій надійності. Запропонований розподіл трансформаторів по цехах відповідає вимогам надійності електропостачання та зручності експлуатації.

5. Проведено розрахунок і вибір засобів КРП на шинах 0,4 кВ цехових підстанцій та на шинах 10 кВ ГПП. Запропоновано використання конденсаторних установок з оптимальним розподілом їх потужності як по підстанціях, так і по вузлах навантаження, що обмежує зниження перетоків реактивної потужності, зменшення втрат у мережах та підвищення коефіцієнта потужності системи електропостачання.

6. Отримані результати розрахунків підтверджують технічну та економічну доцільність прийнятих рішень і можуть бути використані для вибору обладнання та розроблення заходів з підвищення енергоефективності і надійності електричних мереж.

7. Розроблено схему зовнішнього електропостачання підприємства від підстанції енергосистеми напругою 35 кВ із застосуванням двох радіальних повітряних ліній, що забезпечує необхідний рівень резервування. Обґрунтовано розміщення головної понижаючої підстанції (ГПП) на території підприємства та вибір двох силових трансформаторів типу ТДНС-10000/35, що відповідають розрахунковому навантаженню і режимам роботи мережі.

8. Для внутрішньозаводської електричної мережі 10 кВ застосовано радіальну схему з кабельними лініями з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Виконано вибір перерізів кабелів за економічною густиною струму та умовами допустимого нагріву в нормальному і післяаварійному режимі. Підтверджено, що обрані перерізи кабелів забезпечують надійну роботу у мережі без перевищення допустимих струмів.

9. Проведено розрахунок струмів КЗ у мережі вище 1000 В для характерних точок схеми. За отриманими значеннями виконано перевірку термічної та електродинамічної стійкості кабельних ліній і електрообладнання, що підтвердило правильність прийнятих технічних рішень. На основі результатів розрахунків обрано високовольтні вимикачі, трансформатори струму та напруги, а також вимірювальні прилади, які задовольняють вимоги по номінальних параметрах і стійкості до струмів КЗ.

10. У мережі до 1000 В здійснено розподіл електроприймачів по пунктах живлення, вибір розподільчих шаф та АВ для захисту окремих електричних приймачів, групових ліній та вводів. Перевірено узгодження апаратів захисту з перерізами провідників, що забезпечує селективність, надійний захист від перевантажень і коротких замикань.

11. Виконано вибір перерізів ліній живлення цеху та розподільчої мережі, а також розрахунок мереж за умовами допустимих втрат напруги.

Побудовано епюру відхилень напруги та карту селективності дії апаратів захисту, що підтверджує відповідність проектованої системи чинним нормативним вимогам.

12. У цілому прийняті схемні та конструктивні рішення забезпечують надійне, безпечне та економічно доцільне електропостачання локомотивного депо і створюють умови для стабільної роботи електрообладнання в нормальних, післяаварійних та аварійних режимах.



## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Мартиновський, І. В., Оробчук, Б. Я., Стасів, А. З., & Сисак, І. М. (2025). Компенсація реактивної потужності в сучасних електроенергетичних системах. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій “*, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46-48.
2. Orobchuk, B., Sysak, I., Oleh, B., Babiuk, S., & Koval, V. (2023). Development of the reactive power compensation laboratory bench and its integration into the training simulator of dispatch control system. In *ITTAP* (pp. 672-683).
3. Максимчук, О. М., Кушвид, Л. В., Костик, Л. М., & Сисак, І. М. (2020). Компенсація реактивної потужності системи електропостачання. *Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “*, 2, 119-119.
4. Палиця В. С. Вибір методів компенсації реактивної потужності системи електропостачання молокозаводу : автореферат дипломної роботи магістра за спеціальністю „141 — електроенергетика, електротехніка та електромеханіка“/ В. С. Палиця. — Тернопіль: ТНТУ, 2019. — 92 с.
5. Сисак, І. М., & Химич, В. В. (2016). Аналіз та вибір методів компенсації реактивної потужності на електроустановках волоочильної ділянки. *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій “*, 204-204.
6. Маліновський А.А., Хохулін Б.К. Основи електроенергетики та електропостачання: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. - Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2009. – 436 с. ISBN 978-966-553-833-2

7. Бурбело, М. Й. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с. ISBN 978-966-641-450-5
8. Сисак І.М. Електропостачання промислових і муніципальних об'єктів [електронний ресурс]: //Інституційний репозитарій Atutor (код дисципліни ID 1748): офіційний сайт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя – Тернопіль, 2011. – Режим доступу: <https://dl.tntu.edu.ua/index.php>.
9. Сисак І.М. Електричні системи та мережі [електронний ресурс]: //Інституційний репозитарій Atutor (код дисципліни ID 1747): офіційний сайт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя – Тернопіль, 2011.
10. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи: Підручник. – 2-ге вид. – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2009. – 488 с.
11. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі: Навч. посіб. – К.: Знання, 2007. – 292 с. – (Вища освіта ХХІ століття).
12. Orobchuk, B., Buniak, O., Sysak, I., Babiuk, S., Bodnarchuk, I., & Koval, V. (2024). Development of Software for the Implementation of Automated Reserve Input Modes Operation. In *2nd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry* (Vol. 4, pp. 12-14).
13. Orobchuk, B., Babiuk, S., Buniak, O., Sysak, I., Kostyk, L., Nakonechniy, M., & Filiuk, Y. (2023). Development of an educational laboratory stand at the base fast-acting automatic reserve input. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 112(4), 12-25.
14. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT)
15. Правила улаштування електроустановок. / Міненерго вугілля України,. - К., 2017.

16. ДСТУ EN IEC 61000-3-2:2019 Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 3-2. Норми. Норми емісії гармонійних складників струму (обладнання із силою вхідного струму не більше ніж 16 А в одній фазі)
17. ДБН В.2.5-23:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення
18. Сисак, І. М., Іваніга, О. Й., Любка, С. В., & Джуган, Ю. І. (2023). Розрахунок електричного навантажень. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 242-242.
19. Стасів А., Судомир В., Сисак І., Оробчук Б. Розробка програмного модуля для розрахунку центру електричних навантажень енергетичного об'єкту // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2025. – № 361(6). – Грудень.
20. Стасів А.З., Судомир В.П., Миколишин В.В., Сисак І.М., Буняк О.А. Комплекс програмних модулів для проектування електропостачання промислових та муніципальних об'єктів // IX International Scientific and Practical Conference «EDUCATION AND SCIENCE OF TODAY: INTERSECTORAL ISSUES AND DEVELOPMENT OF SCIENCES», Cambridge, 28 November 2025. – Cambridge : «P.C. Publishing House» «UKRLOGOS Group», 2025. – С. 150–157. – ISBN 978-1-8380558-4-4. – DOI 10.36074/logos-28.11.2025.028
21. Макарчук, Г. О., Чміль, І. В., Стасів, А. З., & Сисак, І. М. (2025). Розрахунок центру електричних навантажень у сучасних умовах. *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції „Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій“*, присвячена 180-річчю з дня народження Івана Пулюя та 65-річчю з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 44-45.
22. Стасів А., Судомир В., Сисак І., Оробчук Б. Розробка програмного модуля для розрахунку центру електричних навантажень енергетичного об'єкту // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2025. – № 359(6.1). – С. 465-472. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-65>

23. Буняк О., Стасів А., Оробчук Б., Судомир В. Розробка програмного модуля для розрахунку порівняльних характеристик трансформаторів з врахуванням умови економічності // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences.* – 2025. – № 357(5.2). – С. 115–122. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-357-73>.

24. Стефанюк, А. Л., Гуменюк, А. А., Стасів, А. З., & Сисак, І. М. (2024). Підвищення технічної надійності підстанції. *Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 267-268.

25. Мартиновський І. В. Забезпечення надійності функціонування розподільчої мережі Тернопільського РЕМ : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра : спец. 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / наук. кер. І. М. Сисак. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. 70 с.

26. Сисак, І. М., & Корюков, С. В. (2023). Забезпечення надійності системи електропостачання деревообробного цеху. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 237-238.

27. "Електричні машини": навчальний посібник / укладачі: Буняк О.А., Сисак І.М., Бабюк С.М., Оробчук Б.Я., Осадца Я.М, Коваль В.П., – Тернопіль : видавництво ФОП Паляниця В.А., 2023. – 324 с. Текст: укр. - ISBN 978-617-7875-57-3

28. Купчик, В. О., Сердюк, Т. Т., Головачук, Г. І., Волосинецький, Р. Б., Мовчан, Л. Т., & Сисак, І. М. (2022). Підвищення надійності та пропускної здатності трансформаторних підстанцій. *Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 80-81.

29. Бацюра, Є. В., Шинькар, Р. І., Ухін, А. Р., Костецький, П. Б., Осадчук, С. В., & Сисак, І. М. (2021). Забезпечення надійності системи

електропостачання промислових об'єктів. *Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 9-10.

30. Романишен, О. В., Клименко, Д. Р., & Сисак, І. М. (2020). Підвищення надійності системи електропостачання. *Збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 2, 128-128.

31. Ткач, М. В., Сисак, І. М., Миколишин, В. В., & Сердюк, Т. Т. (2017). Підвищення надійності системи електропостачання промислових підприємств. *Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 3, 125-125.

32. Бабанін, Н. В., Сисак, І. М., Гапонюк, А. В., & Максимчук, О. М. (2017). Вибір трансформаторів підстанцій за навантажувальною здатністю. *Збірник тез доповідей VI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 3, 89-89.

33. Сисак, І. М., & Скакун, О. І. (2016). Дослідження та вибір заходів підвищення надійності системи електропостачання трансформаторної підстанції 35/10 кВ. *Матеріали V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів „Актуальні задачі сучасних технологій“*, 192-192.

34. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.

35. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

36. Гурик О.Я. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці [електронний ресурс]: //Інституційний репозитарій Atutor (код дисципліни ІД 4656): офіційний сайт Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя – Тернопіль, 2017. – Режим доступу: <https://dl.tntu.edu.ua/index.php>.

# ДОДАТКИ

## Додаток А

## Розрахункові навантаження цеху з ремонту електровозів

| Вихідні дані            |                                    |                  |                                   |                           |                                        |           | Розрахункові величини                             |                                                         |                               | м, модуль силовій зборки | n <sub>еф</sub> , ефективне число ЕП | K <sub>м</sub> , коефіцієнт максимуму навантаження | Розрахункова потужність          |                             |          | I <sub>p</sub> , розрахунковий струм, А |
|-------------------------|------------------------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------|-----------------------------------------|
| За завданням технологів |                                    |                  |                                   |                           | По довідковим даним                    |           | P <sub>см</sub> = K <sub>в</sub> * P <sub>н</sub> | Q <sub>см</sub> = K <sub>в</sub> * P <sub>н</sub> * tgφ | P <sub>p</sub> , активна, кВт |                          |                                      |                                                    | Q <sub>p</sub> , реактивна, кВАр | S <sub>p</sub> , повна, кВА |          |                                         |
| № п/п                   | Назва ЕП                           | Кількість ЕП, шт | Номінальна встановлена потужність |                           | Коефіцієнт використання K <sub>в</sub> | cosφ/tgφ  |                                                   |                                                         |                               |                          |                                      |                                                    |                                  |                             |          |                                         |
|                         |                                    |                  | одного ЕП, P <sub>н</sub>         | загальна P <sub>в</sub> * |                                        |           |                                                   |                                                         |                               |                          |                                      |                                                    |                                  |                             |          |                                         |
| ПР1, група А            |                                    |                  |                                   |                           |                                        |           |                                                   |                                                         |                               |                          |                                      |                                                    |                                  |                             |          |                                         |
| 1                       | Зварювальний трансформатор         | 1                | 20                                | 20                        | 0,25                                   | 0.35/2.68 | 5                                                 | 13,4                                                    |                               |                          |                                      |                                                    |                                  |                             |          |                                         |
| 2                       | Зарядний пристрій                  | 1                | 15                                | 15                        | 0,2                                    | 0.8/0.75  | 3                                                 | 2,25                                                    |                               |                          |                                      |                                                    |                                  |                             |          |                                         |
| 3                       | Зварювальний трансформатор ПВ=40 % | 1                | 12,6                              | 12,6                      | 0,25                                   | 0.4/2.3   | 3,15                                              | 7,245                                                   |                               |                          |                                      |                                                    |                                  |                             |          |                                         |
| 4                       | Зарядний пристрій                  | 1                | 15                                | 15                        | 0,2                                    | 0.8/0.75  | 3                                                 | 2,25                                                    |                               |                          |                                      |                                                    |                                  |                             |          |                                         |
| 5 8                     | Домкрат                            | 4                | 15                                | 60                        | 0,1                                    | 0.6/1.33  | 6                                                 | 59,7                                                    |                               |                          |                                      |                                                    |                                  |                             |          |                                         |
| 9                       | Кран-балка                         | 1                | 30                                | 30                        | 0,06                                   | 0.5/1.73  | 1,8                                               | 3,114                                                   |                               |                          |                                      |                                                    |                                  |                             |          |                                         |
|                         | Усього за г.А.                     | 9                | 12.6-30                           | 152,6                     | 0,14384                                |           | 21,95                                             | 87,959                                                  | <3                            | 9                        | 2,2                                  | 48,29                                              | 96,755                           |                             |          |                                         |
| 62                      | Вентилятор                         | 1                | 20                                | 20                        | 0,6                                    | 0.6/1.33  |                                                   |                                                         |                               |                          |                                      | 20                                                 | 26,6                             |                             |          |                                         |
|                         | Усього по гр.Б                     | 1                | 20                                | 20                        |                                        |           |                                                   |                                                         |                               |                          |                                      | 20                                                 | 26,6                             |                             |          |                                         |
|                         | Всього за ПР1                      | 10               | 12.6-30                           | 172,6                     |                                        |           |                                                   |                                                         |                               |                          |                                      | 68,29                                              | 123,35                           | 140,996                     | 214,4757 |                                         |



**ПР2, група А**

|          |                  |   |       |      |        |           |       |         |    |     |      |        |        |  |  |
|----------|------------------|---|-------|------|--------|-----------|-------|---------|----|-----|------|--------|--------|--|--|
| 10.11    | Механічний прес  | 2 | 3,5   | 7    | 0,17   | 0.65/1.17 | 1,19  | 1,3923  |    |     |      |        |        |  |  |
| 12,13,18 | Верстати         | 3 | 2-5.5 | 12,5 | 0,12   | 0.5/8.27  | 1,5   | 12,405  |    |     |      |        |        |  |  |
| 14       | Випрямляч        | 1 | 8     | 8    | 0,3    | 0.6/1.33  | 2,4   | 3,192   |    |     |      |        |        |  |  |
| 15-17    | Зв.трансформатор | 3 | 20    | 60   | 0,25   | 0.35/2.68 | 15    | 40.2    |    | 8,7 |      |        |        |  |  |
|          | Усього за г.А.   | 9 | 2 20  | 87,5 | 0,2296 |           | 20,09 | 57,1893 | >3 | 8   | 1,99 | 39,979 | 62,908 |  |  |

**ПР2, група Б**

|          |                             |    |        |      |          |           |       |         |    |     |      |        |        |         |          |
|----------|-----------------------------|----|--------|------|----------|-----------|-------|---------|----|-----|------|--------|--------|---------|----------|
| 67       | Вентилятор                  | 1  | 7,5    | 7,5  | 0,6      | 0.6/1.33  |       |         |    |     |      | 7,5    | 9,975  |         |          |
|          | Усього по гр.Б              | 1  |        | 7,5  |          |           |       |         |    |     |      |        |        |         |          |
|          | <b>Всього за ПР2</b>        | 10 |        | 95   |          |           |       |         |    |     |      | 47,479 | 72,88  | 86,9841 | 132,3153 |
| 19.20,28 | Верстати                    | 3  | 3      | 9    | 0,12     | 0.5/1.73  | 1,08  | 1,8684  |    |     |      |        |        |         |          |
| 21       | Прес фрекційний             | 1  | 10     | 10   | 0,17     | 0.65/1.17 | 1,7   | 1,989   |    |     |      |        |        |         |          |
| 22       | Випробувальний<br>стенд     | 1  | 5,5    | 5,5  | 0,3      | 0.7/1.02  | 1,65  | 1,683   |    |     |      |        |        |         |          |
| 26.27    | Муфельна піч                | 2  | 15     | 30   | 0,5      | 0.95/0.33 | 15    | 4,95    |    | 7,3 |      |        |        |         |          |
|          | Усього за г.А.              | 7  | 3 15   | 54,5 | 0,356514 |           | 19,43 | 10,4904 | >3 | 7   | 1,8  | 34,974 | 11,54  | 36,8285 | 56,02147 |
|          | <b>Результат по<br/>ПР3</b> | 7  |        | 54,5 |          |           |       |         |    |     |      | 34,974 | 11,54  | 36,8285 | 56,02147 |
| 23_25    | Випробувальний<br>стенд     | 3  | 5,5    | 16,5 | 0,3      | 0.7/1.02  | 4,95  | 5,049   |    |     |      |        |        |         |          |
| 29, 30   | Зв.трансформатор            | 2  | 20     | 40   | 0,25     | 0.35/2.68 | 10    | 26,8    |    | 5,6 |      |        |        |         |          |
|          | Усього за г.А.              | 5  | 5,5 20 | 56,5 | 0,264602 |           | 14,95 | 31,849  | >3 | 5   | 2,42 | 36,179 | 35,034 |         |          |

**ПР4, група Б**

|    |                             |   |    |      |     |          |  |  |  |  |  |        |        |         |          |
|----|-----------------------------|---|----|------|-----|----------|--|--|--|--|--|--------|--------|---------|----------|
| 63 | Вентилятор                  | 1 | 20 | 20   | 0,6 | 0.6/1.33 |  |  |  |  |  | 20     | 26,6   |         |          |
|    | Усього по гр.Б              | 1 |    | 20   |     |          |  |  |  |  |  |        |        |         |          |
|    | <b>Результат по<br/>ПР4</b> | 6 |    | 76,5 |     |          |  |  |  |  |  | 56,179 | 61,634 | 83,3955 | 126.8566 |

**ПР5, група А**

|               |                  |   |        |      |          |           |       |         |    |   |      |        |       |  |  |
|---------------|------------------|---|--------|------|----------|-----------|-------|---------|----|---|------|--------|-------|--|--|
| 31, 32,<br>37 | Кран-балка       | 3 | 7.5-10 | 27,5 | 0,06     | 0.5/1.73  | 1,65  | 2,8545  |    |   |      |        |       |  |  |
| 33,35,36      | Верстати         | 3 | 3 5    | 11   | 0,12     | 0.5/1.73  | 1,32  | 2,2836  |    |   |      |        |       |  |  |
| 34            | Зв.трансформатор | 1 | 20     | 20   | 0,25     | 0.35/2.68 | 5     | 13,4    |    |   |      |        |       |  |  |
| 38            | Випрямляч        | 1 | 20     | 20   | 0,3      | 0.6/1.33  | 6     | 7,98    |    |   |      |        |       |  |  |
|               | Усього за г.А.   | 8 | 3 20   | 78,5 | 0,177962 |           | 13,97 | 26,5181 | >3 | 6 | 2,64 | 36,881 | 29,17 |  |  |

**ПР5, група Б**

|                     |                                        |    |        |       |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
|---------------------|----------------------------------------|----|--------|-------|-------|-----------|------|--------|----|---|------|--------|--------|---------|----------|
| 64, 65              | Вентилятор                             | 2  | 7.5    | 15    | 0.6   | 0.6/1.33  |      |        |    |   |      | 15     | 19,95  |         |          |
|                     | Усього по гр.Б                         |    |        |       |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
|                     | <b>Усього за ПР5</b>                   | 10 | 3 20   | 93.5  |       |           |      |        |    |   |      | 51,881 | 49,12  | 71,445  | 108,6781 |
| <b>ПР6, група А</b> |                                        |    |        |       |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
| 39 48               | Верстати                               | 10 | 5,5 22 | 110   | 0.12  | 0.5/1.73  | 13,2 | 22,836 | 4  |   |      |        |        |         |          |
|                     | Усього за г.А.                         |    |        |       | 0.12  |           |      |        | >3 | 8 | 2,72 | 35,904 | 25,12  |         |          |
| <b>ПР6, група Б</b> |                                        |    |        |       |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
| 66                  | Вентилятор                             | 1  | 7.5    | 7.5   | 0.6   | 0.6/1.33  |      |        |    |   |      | 7,5    | 9,975  |         |          |
|                     | Усього по гр.Б                         |    |        |       |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
|                     | <b>Всього за ПР6</b>                   | 11 | 5,5 22 | 117.5 |       |           |      |        |    |   |      | 43,404 | 35,095 | 55,817  | 84,9057  |
| <b>ПР7, група А</b> |                                        |    |        |       |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
| 49, 50              | Гідравлічний прес                      | 2  | 15     | 30    | 0.17  | 0.65/1.17 | 5,1  | 5,967  |    |   |      |        |        |         |          |
| 51.53               | Зв.трансформатор                       | 2  | 10 20  | 30    | 0.25  | 0.35/2.68 | 7,5  | 20,1   |    |   |      |        |        |         |          |
| 52                  | Кран-балка                             | 1  | 15     | 15    | 0.06  | 0.5/1.73  | 0,9  | 1,557  |    |   |      |        |        |         |          |
|                     | Усього за г.А.                         | 5  | 10 20  | 75    | 0.18  |           | 13,5 | 27,624 | <3 | 5 | 2,42 | 32,67  | 30,387 |         |          |
| <b>ПР7, група Б</b> |                                        |    |        |       |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
| 54                  | Електромот                             | 1  | 20     | 20    | 0.8   | 0.8/0.75  | 16   | 12     |    |   |      |        |        |         |          |
| 55                  | Електропід                             | 1  | 30     | 30    | 0.75  | 0.95/0.33 | 22,5 | 7,425  |    |   |      |        |        |         |          |
| 56.57               | Вентилятор горна                       | 2  | 15     | 30    | 0.75  | 0.85/0.62 | 22,5 | 13,95  |    |   |      |        |        |         |          |
| 68.69               | Вентилятор                             | 2  | 7.5    | 15    | 0.6   | 0.6/1.33  | 9    | 11,97  |    |   |      |        |        |         |          |
|                     | Усього по гр.Б                         | 6  | 7,6 30 | 95    |       |           | 70   | 45,345 |    |   | 1    | 70     | 45,345 |         |          |
|                     | <b>Всього за ПР7</b>                   | 11 |        | 170   |       |           |      |        |    |   |      | 102,67 | 75,73  | 127,579 | 194,0659 |
| <b>ПР8, група А</b> |                                        |    |        |       |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
| 58, 59              | Кран-балка                             | 2  | 10     | 20    | 0.06  | 0.5/1.73  | 1,2  | 2,076  |    |   |      |        |        |         |          |
| 60, 61              | Токарний верстат                       | 2  | 15     | 30    | 0.12  | 0.5/1.73  | 3,6  | 6,228  |    |   |      |        |        |         |          |
|                     | Усього за г.А.                         | 4  | 10 15  | 50    | 0.096 |           | 4,8  | 8,304  | <3 | 4 | 3,43 | 16,464 | 9,1344 |         |          |
| <b>ПР8, група Б</b> |                                        |    |        |       |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
| 70                  | Вентилятор                             | 1  | 7.5    | 7.5   | 0.6   | 0.6/1.33  |      |        |    |   |      | 7,5    | 9,975  |         |          |
|                     | Усього по гр.Б                         | 1  | 7.5    | 7.5   |       |           |      |        |    |   |      |        |        |         |          |
|                     | <b>Підсумок по ПР8</b>                 | 5  | 7,7 15 | 57.5  |       |           |      |        |    |   |      | 23,964 | 19,11  | 30,6503 | 46,62356 |
|                     | <b>Усього по силовому навантаженні</b> | 70 | 2 30   | 837.1 |       |           |      |        |    |   |      | 428,84 | 448,45 | 620,505 | 943,878  |

## Визначення повного навантаження підприємства в цілому

| №   | Назва                            | Силове навантаження  |                |      |       |                      |                       | Освітлювальне навантаження |          |                         |                            |                        |                  |      |      |                       | Сил. + осв. навантаження |                                       |                                       |                     |
|-----|----------------------------------|----------------------|----------------|------|-------|----------------------|-----------------------|----------------------------|----------|-------------------------|----------------------------|------------------------|------------------|------|------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------|
|     |                                  | P <sub>н</sub> , кВт | K <sub>с</sub> | cosφ | tgφ   | P <sub>р</sub> , кВт | Q <sub>р</sub> , кВАр | F,м²                       | Тип ламп | P <sub>уд.</sub> для ЛН | P <sub>уд.о</sub> , кВт/м² | P <sub>н.о</sub> , кВт | K <sub>о.с</sub> | cosφ | tgφ  | P <sub>ро</sub> , кВт | Q <sub>ро</sub> , кВАр   | P <sub>р</sub> +P <sub>ро</sub> , кВт | Q <sub>р</sub> +Q <sub>ро</sub> ,кВАр | S <sub>р</sub> ,кВА |
|     | Споживачі Електроенергії 0,38 кВ |                      |                |      |       |                      |                       |                            |          |                         |                            |                        |                  |      |      |                       |                          |                                       |                                       |                     |
| 1.  | Цех по ремонту тепловозів        | 1780                 | 0,6            | 0,75 | 0,882 | 1068                 | 941,98                | 56000                      | ДРЛ      | 15                      | 0,00375                    | 210                    | 0,95             | 0,35 | 2,68 | 199,5                 | 534,66                   | 1267,5                                | 1476,636                              |                     |
| 2.  | Цех по ремонту колійної техніки  | 930                  | 0,8            | 0,75 | 0,882 | 744                  | 656,21                | 53912                      | ДРЛ      | 15                      | 0,00375                    | 202,17                 | 0,95             | 0,35 | 2,68 | 192,062               | 514,72                   | 936,0615                              | 1170,933                              |                     |
| 3.  | Цех по ермонту електровозів      | 837,1                | 0,5            | 0,7  | 1,02  | 418,55               | 426,92                | 25185                      | ДРЛ      | 15                      | 0,00375                    | 94,444                 | 0,95             | 0,35 | 2,68 | 89,722                | 240,45                   | 508,2716                              | 667,3748                              | 838,89              |
| 4.  | Адміністративний корпус          | 450                  | 0,5            | 0,6  | 1,33  | 225                  | 299,25                | 16917                      | LED      | 16                      | 0,0032                     | 54,134                 | 0,9              | 0,95 | 0,33 | 48,721                | 16,078                   | 273,721                               | 315,3279                              |                     |
| 5.  | Побутовий корпус                 | 100                  | 0,5            | 0,7  | 1,02  | 50                   | 51                    | 4156,3                     | LED      | 16                      | 0,0032                     | 13,3                   | 0,9              | 0,95 | 0,33 | 11,97                 | 3,9501                   | 61,97                                 | 54,9501                               |                     |
| 6.  | Склад кисневих балонів           | 200                  | 0,3            | 0,65 | 1,169 | 60                   | 70,14                 | 1494,5                     | ДРЛ      | 17                      | 0,00425                    | 6,3516                 | 0,6              | 0,5  | 1,73 | 3,812                 | 6,593                    | 63,81098                              | 76,73299                              |                     |
| 7.  | Склад балонів зрідженого газу    | 150                  | 0,3            | 0,7  | 1,02  | 45                   | 45,9                  | 1586                       | ДРЛ      | 17                      | 0,00425                    | 6,7405                 | 0,6              | 0,5  | 1,73 | 4,0443                | 6,997                    | 49,0443                               | 52,89664                              |                     |
| 8.  | Матеріальний склад               | 70                   | 0,25           | 0,6  | 1,33  | 17,5                 | 23,275                | 20240                      | LED      | 15                      | 0,003                      | 60,72                  | 0,6              | 0,35 | 2,68 | 36,432                | 97,638                   | 53,932                                | 120,9128                              |                     |
| 9.  | Компресорна                      | 850                  | 0,7            | 0,8  | 0,75  | 595                  | 446,25                | 12635                      | ДРЛ      | 17                      | 0,00425                    | 53,702                 | 0,85             | 0,35 | 2,68 | 45,646                | 122,33                   | 640,6465                              | 568,5825                              |                     |
| 10. | Роздаткова ПММ                   | 400                  | 0,4            | 0,7  | 1,02  | 160                  | 163,2                 | 6302,4                     | ДРЛ      | 17                      | 0,00425                    | 26,785                 | 0,85             | 0,4  | 2,3  | 22,767                | 52,366                   | 182,7674                              | 215,5651                              |                     |
| 11. | Склад піску                      | 350                  | 0,25           | 0,6  | 1,33  | 87,5                 | 116,38                | 5337,5                     | ДРЛ      | 15                      | 0,00375                    | 20,016                 | 0,6              | 0,5  | 1,73 | 12,01                 | 20,776                   | 99,50938                              | 137,1512                              |                     |
| 12. | Піскосушарка                     | 460                  | 0,35           | 0,7  | 1,02  | 161                  | 164,22                | 4074                       | ДРЛ      | 15                      | 0,00375                    | 15,278                 | 0,85             | 0,6  | 1,33 | 12,986                | 17,271                   | 173,9859                              | 181,4912                              |                     |
| 13. | Насосна                          | 1200                 | 0,7            | 0,8  | 0,75  | 840                  | 630                   | 3066                       | ДРЛ      | 16                      | 0,004                      | 12,264                 | 0,85             | 0,35 | 2,68 | 10,4244               | 27,937                   | 850,4244                              | 657,9374                              |                     |
|     | Усього по 0,38 кВ                | 7777,1               |                |      |       |                      |                       |                            |          |                         |                            |                        |                  |      |      |                       |                          | 5161,645                              | 5696,491                              | 7687,2              |
|     | Споживачі Електроенергії 10 кВ   |                      |                |      |       |                      |                       |                            |          |                         |                            |                        |                  |      |      |                       |                          |                                       |                                       |                     |
| 9   | Компресорна                      | 6400                 | 0,7            | 0,8  | 0,75  | 4480                 | 3360                  |                            |          |                         |                            |                        |                  |      |      |                       |                          |                                       |                                       |                     |
| 13  | Насосна                          | 2500                 | 0,7            | 0,8  | 0,75  | 1750                 | 1312,5                |                            |          |                         |                            |                        |                  |      |      |                       |                          |                                       |                                       |                     |
|     | Всього по 10 кВ                  | 8900                 |                |      |       | 6230                 | 4672,5                |                            |          |                         |                            |                        |                  |      |      |                       |                          |                                       |                                       | 7787,5              |
|     | Всього по заводу                 |                      |                |      |       |                      |                       |                            |          |                         |                            |                        |                  |      |      |                       |                          | 11391,64                              | 10368,99                              | 15404,1             |

### Вибір перерізів розподільчої мережі цеху

Умови вибору перерізів провідників для електроприймачів:

$$1) I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{ном}}}{k_{\text{прокл}}}; 2) I_{\text{доп}} \geq \frac{k_3 \cdot I_3}{k_{\text{прокл}}}$$

Для проводів, покладених у кабель-каналі,  $k_{\text{прокл}} = 1$ .

Значення номінальних струмів електроприймачів наведено в таблиці 2.14.

Приклад розрахунків для відгалужень до зарядного пристрою (ПР-1):

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{ном}}}{k_{\text{прокл}}} \Rightarrow 37 \geq \frac{28,49}{1}; 37 \geq 28,49;$$

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{k_3 \cdot I_3}{k_{\text{прокл}}} \Rightarrow 37 \geq \frac{1 \cdot 31,5}{1}; 37 \geq 31,5;$$

де  $I_3 = I_{\text{ном.розч}} = 31,5 \text{ А}, k_3 = 1$ .

По табл. вибираємо провід марки АВВГ - 4 (1х8):  $I_{\text{доп}} = 37 \text{ А}$ .

Таблиця 2.14 - Вибір перерізу провідників і захисних апаратів.

| № по плану цеху | Назва виробничого механізму         | Р <sub>ном</sub> | I <sub>ном</sub> | I <sub>пуск</sub> | Тип вимикача | I <sub>т.розр</sub> | I <sub>доп</sub> | Марка КЛ        |
|-----------------|-------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|--------------|---------------------|------------------|-----------------|
|                 |                                     | кВт              | А                | А                 |              |                     |                  |                 |
| ПР1             |                                     |                  |                  |                   |              |                     |                  |                 |
| 1               | Зварювальний трансформатор          | 20,0             | 86.8             | 434.1             | ВА51-35      | 100,0               | 120,0            | АВВГ<br>1(4х50) |
| 2,4             | Зарядний пристрій                   | 15,0             | 28.49            | 142.44            | ВА51-35      | 31.5                | 37,0             | АВВГ<br>1(4х8)  |
| 3               | Зварювальний трансформатор ПВ = 40% | 12.6             | 47.86            | 239.3             | ВА51-35      | 50,0                | 55,0             | АВВГ<br>1(4х16) |
| 9               | Кран-балка                          | 30,0             | 95.95            | 479.79            | ВА51-35      | 100,0               | 120,0            | АВВГ<br>1(4х50) |
| 5-8             | Домкрат                             | 15,0             | 30.96            | 154.82            | ВА51-35      | 31.5                | 37,0             | АВВГ<br>1(4х8)  |

## Продовження таблиці 2.14

|       |                                 |      |       |          |         |       |       |               |
|-------|---------------------------------|------|-------|----------|---------|-------|-------|---------------|
| 62    | Вентилятор                      | 20,0 | 56.27 | 281,36   | BA51-35 | 63,0  | 70,0  | АВВГ 1(4х25)  |
| ІІР2  |                                 |      |       |          |         |       |       |               |
| 10-11 | Механічний прес                 | 3.5  | 10.23 | 51.13    | BA51-31 | 12.5  | 19,0  | АВВГ 1(4х2,5) |
| 12    | Свердильний верстат             | 2,0  | 8.9   | 43.4     | BA51-31 | 12.5  | 19,0  | АВВГ 1(4х2,5) |
| 13    | Точильний верстат               | 5.5  | 20.89 | 104.6    | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| 14    | Випрямляч                       | 8,0  | 20.35 | 101.27   | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| 15-17 | Зварювальний трансформатор      | 20,0 | 86.82 | 31.4     | BA51-31 | 100,0 | 120,0 | АВВГ 1(4х50)  |
| 18    | Вертикально-свердильний верстат | 5,0  | 18.99 | 94.97    | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| 67    | Вентилятор                      | 7.5  | 21.1  | 105.5    | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| ІІР3  |                                 |      |       |          |         |       |       |               |
| 19,20 | Верстати                        | 3,0  | 13.02 | 65,12    | BA51-26 | 15,0  | 19,0  | АВВГ 1(4х2,5) |
| 21    | Прес фрикційний                 | 10,0 | 28.22 | 146,09   | BA51-26 | 32,0  | 37,0  | АВВГ 1(4х8)   |
| 22    | Випробувальний стенд            | 5.5  | 11.94 | 59,69    | BA51-26 | 15,0  | 19,0  | АВВГ 1(4х2,5) |
| 26-27 | Муфельна піч                    | 15,0 | 23.99 | 119,95   | BA51-26 | 32,0  | 37,0  | АВВГ 1(4х8)   |
| ІІР4  |                                 |      |       |          |         |       |       |               |
| 23-25 | Випробувальний стенд            | 5.5  | 11.94 | 59,68847 | BA51-31 | 16,0  | 19,0  | АВВГ 1(4х2,5) |
| 29-30 | Зварювальний трансформатор      | 20,0 | 86.82 | 434,0979 | BA51-31 | 100,0 | 120,0 | АВВГ 1(4х50)  |
| 63    | Вентилятор                      | 20,0 | 56.27 | 281,3598 | BA51-31 | 63,0  | 70,0  | АВВГ 1(4х25)  |
| ІІР5  |                                 |      |       |          |         |       |       |               |
| 31,37 | Кран-балка                      | 10,0 | 23.99 | 119.95   | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| 32    | Кран-балка                      | 7.5  | 31.98 | 159.93   | BA51-31 | 63,0  | 70,0  | АВВГ 1(4х25)  |
| 33    | Вертикально-свердильний верстат | 5,0  | 21.7  | 108.53   | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| 34    | Зварювальний трансформатор      | 20,0 | 86.82 | 434.1    | BA51-31 | 100,0 | 120,0 | АВВГ 1(4х50)  |

## Продовження таблиці 2.14

|              |                               |      |       |         |         |       |       |               |
|--------------|-------------------------------|------|-------|---------|---------|-------|-------|---------------|
| 35-36        | Фрезерувальний верстат        | 3,0  | 13.02 | 65.11   | BA51-31 | 16,0  | 19,0  | АВВГ 1(4х2,5) |
| 38           | Випрямляч                     | 20,0 | 50.64 | 253.33  | BA51-31 | 63,0  | 70,0  | АВВГ 1(4х25)  |
| 64-65        | Вентилятор                    | 7.5  | 21.1  | 105.53  | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| ПР6          |                               |      |       |         |         |       |       |               |
| 39           | Координатно-розточний верстат | 22,0 | 95.5  | 477.51  | BA51-31 | 100,0 | 120,0 | АВВГ 1(4х50)  |
| 40,41, 44-46 | Верстати                      | 7.5  | 32.56 | 162.79  | BA51-31 | 63,0  | 70,0  | АВВГ 1(4х25)  |
| 47           | Точильний верстат             | 5.5  | 23.87 | 119.38  | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| 48           | Токарний верстат              | 15,0 | 65.11 | 235.57  | BA51-31 | 80,0  | 85,0  | АВВГ 1(4х35)  |
| 66           | Вентилятор                    | 7.5  | 21.1  | 105.5   | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| ПР7          |                               |      |       |         |         |       |       |               |
| 49-50        | Гідравлічний прес             | 15,0 | 43.83 | 219.136 | BA51-31 | 63,0  | 70,0  | АВВГ 1(4х25)  |
| 51           | Зварювальний трансформатор    | 20,0 | 86.82 | 434.1   | BA51-31 | 100,0 | 120,0 | АВВГ 1(4х50)  |
| 52           | Кран-балка                    | 15,0 | 65.11 | 325.57  | BA51-31 | 80,0  | 85,0  | АВВГ 1(4х35)  |
| 53           | Зварювальний трансформатор    | 10,0 | 43.41 | 217,05  | BA51-31 | 63,0  | 70,0  | АВВГ 1(4х25)  |
| 54           | Електромотот                  | 20,0 | 54.26 | 271.3   | BA51-31 | 63,0  | 70,0  | АВВГ 1(4х25)  |
| 55           | Електропіч                    | 30,0 | 47.97 | 239.9   | BA51-31 | 63,0  | 70,0  | АВВГ 1(4х25)  |
| 56-57        | Вентилятор горна              | 15,0 | 28.22 | 141.12  | BA51-31 | 31,0  | 37,0  | АВВГ 1(4х8)   |
| 68-69        | Вентилятор                    | 7.5  | 21.1  | 105.51  | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| ПР8          |                               |      |       |         |         |       |       |               |
| 58-59        | Кран-балка                    | 10,0 | 23.99 | 119.9   | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |
| 60,61        | Токарний верстат              | 15,0 | 65.11 | 325.6   | BA51-31 | 80,0  | 85,0  | АВВГ 1(4х35)  |
| 70           | Вентилятор                    | 7.5  | 21.1  | 105.5   | BA51-31 | 25,0  | 27,0  | АВВГ 1(4х5)   |

### Розрахунок мережі живлення та розподільчої мережі за умовами допустимої втрати напруги та побудова епюри відхилень напруги

Розрахунок мережі живлення та розподільчої мережі за умовами допустимої втрати напруги і побудову епюри відхилень напруги виконуємо для ланцюжка ліній від шин ГПП до затискачів найбільш віддаленого і потужного електроприймача (№ 55).

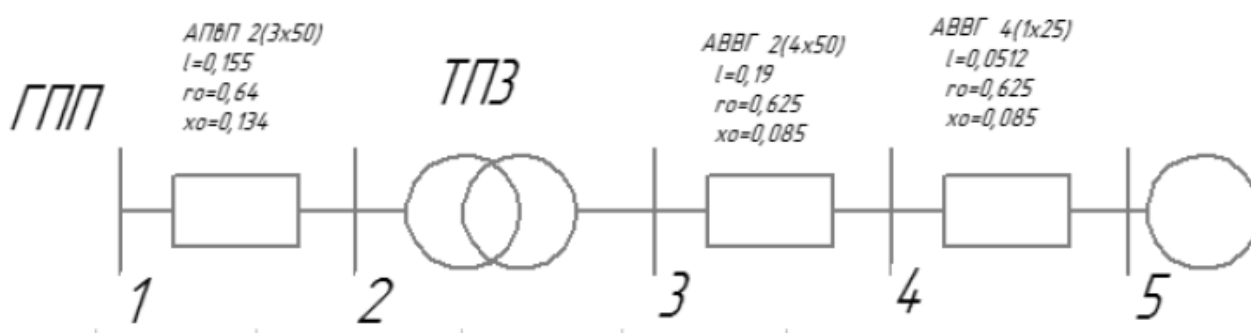


Рисунок 2.10 - Ділянка мережі для розрахунків втрат напруги та побудови епюри відхилень напруги

Розрахунок втрат напруги у різних елементах обраного ланцюжка проводимо по наведеним нижче формулам.

Для трансформатора:

$$\Delta U_m \% = \beta_m (U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2) + \frac{\beta_m^2}{200} (U_a \cdot \sin \varphi_2 - U_p \cdot \cos \varphi_2)$$

де -  $\beta_m = \frac{S_{\text{факт}}}{S_{\text{н.тр}}}$  - фактичний коефіцієнт завантаження трансформатора;

$S_{\text{факт}}$  - фактичне навантаження одного трансформатора, кВА;

$S_{\text{н.тр}}$  - номінальна потужність цехового трансформатора, кВА;

$$U_a = \frac{\Delta P_{\kappa 3} \cdot 100\%}{S_{н.тр}} - \text{активна складова напруги короткого замикання цехового}$$

трансформатора, %;

$\Delta P_{\kappa 3}$  – втрати активної потужності при КЗ, кВт;

$U_p = \sqrt{U_{\kappa}^2 - U_a^2}$  – реактивна складова напруги короткого замикання цехового трансформатора, %;

$U_{\kappa}$  - напруга короткого замикання, %;

$\cos\varphi_2$  і  $\sin\varphi_2$  - коефіцієнт потужності вторинного навантаження трансформатора і відповідний йому  $\sin\varphi_2$ .

Для лінії

$$\Delta U\% = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{10 \cdot U_i^2}$$

де  $P$  і  $Q$  - відповідно величини активної та реактивної потужностей, переданих по розрахунковій ділянці в режимі, що розглядається, кВт і кВАр;

$R$  і  $X$  – активний та індуктивний опір даної ділянки мережі, Ом;

$U_i$  - напруга на даній ділянці мережі (на початку ділянки), кВ.

*Розрахунок для максимального режиму навантажень*

Ділянка 1-2 (ГПП - ТП-3):

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} \cdot R_{12} + Q_{12} \cdot X_{12}}{10 \cdot U_1^2}$$

$$R_{12} = 0,64 \cdot 1,155 = 0,7392 \text{ Ом};$$

$$X_{12} = 0,134 \cdot 1,155 = 0,15477 \text{ Ом}.$$

Питомий активний та реактивний опір ліній:

$$P_{12} = 508,27 \text{ кВт};$$

$$Q_{12} = 332,375 \text{ кВАр};$$

$$\Delta U_{12} = \frac{508,27 \cdot 0,739 + 332,375 \cdot 0,155}{10 \cdot 10,5^2} = 0,387\%$$

$$\text{Або } \Delta U_{12} = 0,387 \cdot \frac{10,5}{100} = 0,041 \text{ кВ};$$



$$U_2 = 10,5 - 0,041 = 10,459 \text{ кВ.}$$

Ділянка 2-3 (ТСЗ-630/10):

$$\Delta U_m \% = \beta_m (U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2) +$$

$$\frac{\beta_m^2}{200} (U_a \cdot \sin \varphi_2 - U_p \cdot \cos \varphi_2)$$

$$U_a = \frac{\Delta P_{\kappa 2} \cdot 100\%}{S_{н.тр}} = \frac{8,5 \cdot 100\%}{630} = 1,35\%$$

$$U_p = \sqrt{U_{\kappa}^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 1,35^2} = 5,33\%$$

Втрати потужності в трансформаторі:

$$\beta_m = 0,9$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\phi}}{S} = 0.807$$

$$\sin \varphi = 0.44$$

Другим елементом можна знехтувати при  $S_{тр} = 630$  кВА і менше.

$$\Delta U_m \% = \beta_m (U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2) = 3,09\%;$$

$$\Delta U_m = 3.09 \cdot \frac{10.454}{100} = 0.32 \text{ кВ}$$

$$U_3' = 10,459 - 0,32 = 10,136 \text{ кВ}$$

$$U_3 = 0,4 \cdot \frac{10,136}{10,5} = 0,386 \text{ кВ}$$

Ділянка 3-4 (ТП-3 - ПР7):

$$\Delta U_{34} = \frac{P_{34} \cdot R_{34} + Q_{34} \cdot X_{34}}{10 \cdot U_3^2}$$

$$R_{34} = r_{34} \cdot L_{34} = 0,05 \text{ Ом};$$

$$X_{34} = x_{34} \cdot L_{34} = 0,018 \text{ Ом.}$$

Питомий активний та реактивний опір ліній:

$$P_{34} = 103,67 \text{ кВт};$$

$$Q_{34} = 75,73 \text{ кВАр};$$

$$\Delta U_{34} = \frac{103,67 \cdot 0,5 \cdot 0,05 + 73,73 \cdot 0,5 \cdot 0,018}{10 \cdot 0,386^2} = 2,17\%$$

$$\text{Або } \Delta U_{34} = 2,17 \cdot \frac{0,386}{100} = 0,0084 \text{ кВ};$$

$$U_4 = 0,386 - 0,0084 = 0,378 \text{ кВ.}$$

Ділянка 4-5 (ПР8 - ЕП61):

$$\Delta U_{45} = \frac{P_{45} \cdot R_{45} + Q_{45} \cdot X_{45}}{10 \cdot U_4^2}$$

$$R_{45} = r_{45} \cdot L_{45} = 0,031 \text{ Ом};$$

$$X_{45} = x_{45} \cdot L_{45} = 0,0045 \text{ Ом.}$$

Питомий активний та реактивний опір ліній:

$$P_{45} = 30 \text{ кВт};$$

$$Q_{45} = 9,9 \text{ кВАр};$$

$$\Delta U_{45} = \frac{30 \cdot 0,031 + 9,9 \cdot 0,0045}{10 \cdot 0,378^2} = 0,68\%$$

$$\text{Або } \Delta U_{45} = 0,68 \cdot \frac{0,378}{100} = 0,0026 \text{ кВ};$$

$$U_{45} = 0,378 - 0,0026 = 0,38 \text{ кВ.}$$

Відхилення напруги:

$$\delta U_0 = 5\%$$

$$\delta U_1 = \delta U_0 - \delta U_{\text{ТПП}} = 5 - 0,38 = 4,613$$

$$\delta U_2 = \delta U_1 - \delta U_{12} \% = 4,6 - 3,09 = 1,52\%$$

$$\delta U_3 = \delta U_2 - \delta U_{23} \% = 1,52 - 2,17 = -0,65\%$$

$$\delta U_4 = \delta U_3 - \delta U_{34} \% = -0,65 - 0,68 = -1,3\%$$

Для силових мереж відхилення напруги від номінального повинно становити не більше +5%; -2,5%. В даному випадку умова виконується.

*Розрахунок для мінімального режиму навантажень:*

Для визначення потоків потужностей для мінімального режиму користуємося характерним добовим графіком активного та реактивного навантаження.

Ділянка 1-2 (ГПП - ТП-3):

$$\Delta U_{12} = \frac{P_{12} \cdot R_{12} + Q_{12} \cdot X_{12}}{10 \cdot U_1^2}$$

$$R_{12} = 0,64 \cdot 1,155 = 0,7392 \text{ Ом};$$

$$X_{12} = 0,134 \cdot 1,155 = 0,15477 \text{ Ом}.$$

Питомий активний та реактивний опір ліній:

$$P_{12} = 203,31 \text{ кВт};$$

$$Q_{12} = 216,04 \text{ кВАр};$$

$$\Delta U_{12} = \frac{203,31 \cdot 0,739 + 216,04 \cdot 0,155}{10 \cdot 10^2} = 0,18\%$$

$$\text{Або } \Delta U_{12} = 0,18 \cdot \frac{10}{100} = 0,018 \text{ кВ};$$

$$U_2 = 10 - 0,018 = 9,98 \text{ кВ}.$$

Ділянка 2-3 (ТСЗ-630/10):

$$\Delta U_m \% = \beta_m (U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2) + \frac{\beta_m^2}{200} (U_a \cdot \sin \varphi_2 - U_p \cdot \cos \varphi_2)$$

$$U_a = \frac{\Delta P_{кз} \cdot 100\%}{S_{н.тр}} = \frac{8,5 \cdot 100\%}{630} = 1,35\%$$

$$U_p = \sqrt{U_{к}^2 - U_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 1^2} = 5,33\%$$

Втрати потужності в трансформаторі:

$$\beta_m = 0,47$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\phi}}{S} = 0,807$$

$$\sin \varphi = 0,44$$

Другим елементом можна знехтувати при  $S_{тр} = 630 \text{ кВА}$  і менше.

$$\Delta U_m \% = \beta_m (U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2) = 1,61\% ;$$

$$\Delta U_m = 1,61 \cdot \frac{9,98}{100} = 0,16 \text{ кВ}$$

$$U'_3 = 9,98 - 0,16 = 9,82 \text{ кВ}$$

$$U_3 = 0,4 \cdot \frac{9,82}{10} = 0,39 \text{ кВ}$$

Ділянка 3-4 (ТП-1 - ПР8):

$$\Delta U_{34} = \frac{P_{34} \cdot R_{34} + Q_{34} \cdot X_{34}}{10 \cdot U_3^2}$$

$$R_{34} = r_{34} \cdot L_{34} = 0,05 \text{ Ом};$$

$$X_{34} = x_{34} \cdot L_{34} = 0,018 \text{ Ом}.$$

Питомий активний та реактивний опір ліній:

$$P_{34} = 23,96 \text{ кВт};$$

$$Q_{34} = 19,11 \text{ кВАр};$$

$$\Delta U_{34} = \frac{42,4 \cdot 0,05 + 38,6 \cdot 0,018}{10 \cdot 0,39^2} = 1,8\%$$

$$\text{Або } \Delta U_{34} = 1,8 \cdot \frac{0,39}{100} = 0,0071 \text{ кВ};$$

$$U_4 = 0,30 - 0,0071 = 0,386 \text{ кВ}.$$

Ділянка 4-5 (ПР8 - ЕП61):

$$\Delta U_{45} = \frac{P_{45} \cdot R_{45} + Q_{45} \cdot X_{45}}{10 \cdot U_4^2}$$

$$R_{45} = r_{45} \cdot L_{45} = 0,031 \text{ Ом};$$

$$X_{45} = x_{45} \cdot L_{45} = 0,0045 \text{ Ом}.$$

Питомий активний та реактивний опір ліній:

$$P_{45} = 30 \text{ кВт};$$

$$Q_{45} = 9,9 \text{ кВАр};$$

$$\Delta U_{45} = \frac{30 \cdot 0,031 + 9,9 \cdot 0,0045}{10 \cdot 0,386^2} = 0,65\%$$

$$\text{Або } \Delta U_{45} = 0,65 \cdot \frac{0,386}{100} = 0,0025 \text{ кВ};$$

$$U_{45} = 0,386 - 0,0025 = 0,383 \text{ кВ}.$$

Відхилення напруги:

$$\delta U_0 = 5\%$$

$$\delta U_1 = \delta U_0 - \delta U_{III} = 0 - 0,018 = -0,183$$

$$\delta U_2 = \delta U_1 - \delta U_{12} \% = -0,183 - 1,61 = -1,79\%$$

$$\delta U_3 = \delta U_2 - \delta U_{23} \% = -1,79 - 1,8 = -3,6\%$$

$$\delta U_4 = \delta U_3 - \delta U_{34} \% = -4,1 - 0,65 = -4,25\%$$

Для силових мереж відхилення напруги від мінімального повинні становити не більше -5%. У даному випадку умова виконується

Епюри відхилень напруги показано в графічній частині.

### Розрахунок струмів КЗ в мережі до 1 кВ

Розрахунок струмів КЗ проводимо для ділянки цехової мережі від ТП-3 до найбільше потужного електроприймача цеху (№ 55). Отримані дані наносимо на карту селективності дії апаратів захисту.

Розрахунок струмів КЗ в мережі до 1000 В має наступні особливості:

1) приймаємо потужність системи  $S_c = \infty$ , що правомірно при  $S_c \geq 50S_{н.тр}$ , тобто напруга на шинах підстанції вважається незмінною при КЗ у мережі до 1000 В;

2) при розрахунку враховуються активні та реактивні опори до точки КЗ всіх елементів мережі: силового трансформатора, опору струмової котушки автоматичного вимикача і перехідний опір контактів, опір первинної обмотки трансформаторів струму, опір проводів та кабелів;

3) розрахунок ведеться в іменованих одиницях, напруга приймається на 5% вище номінальної напруги мережі. Приймаємо  $U_c = 400$  В.

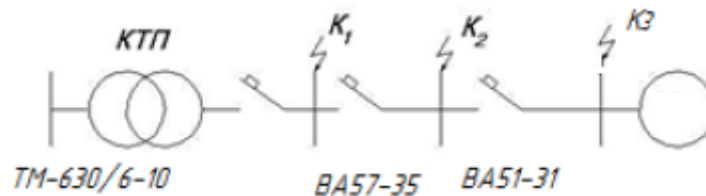


Рисунок 2.12 – Схема для розрахунків струмів короткого замикання в мережі до 1000 В

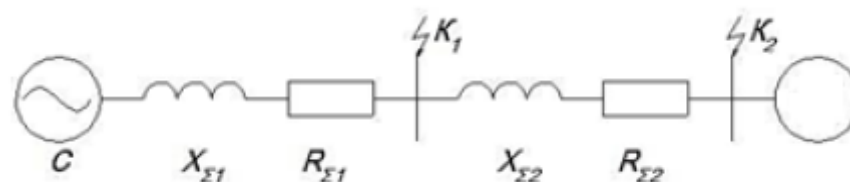


Рисунок 2.13 - Схема заміщення для розрахунків струмів короткого замикання у мережі до 1000 В

Опір котушок максимального струму і контактів вимикачів:

Опір додатковий на шинах ТПЗ:

$$R_{сш} = 15 \text{ мОм.}$$

Розрахунок струмів КЗ для точки К1:

Активний опір трансформатора:

$$R_{mp} = \frac{\Delta P_{K3} \cdot U_c^2}{S_{н.тр}^2} = \frac{8,5 \cdot 400^2}{630^2} = 3,4 \text{ МОм.}$$

Реактивний опір трансформатора:

$$X_{mp} = \sqrt{\left(\frac{U_k \%}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{K3}}{S_{н.тр}^2}\right)^2} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{н.тр}} = \sqrt{\left(\frac{5,5}{100}\right)^2 - \left(\frac{8,5}{630}\right)^2} \cdot \frac{400^2}{630} = 13,54 \text{ МОм}$$

Сумарний повний опір до точки КЗ:

$$Z_{k1} = \sqrt{(R_{mp} + R_{CIII})^2 + (X_{mp})^2} = 22,87 \text{ МОм}$$

Діюче значення струму КЗ:

$$I_{k1} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot Z_{k1}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 22,87} = 10,09 \text{ кА}$$

Ударний струм КЗ:

$$i_y^{k1} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K1} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 10,09 = 14,28 \text{ кА,}$$

де  $k_y$  - ударний коефіцієнт.

Розрахунок струмів КЗ для точки К2:

$$R_{кл1} = r_0 \cdot L = 0,625 \cdot 0,19 = 118,75 \text{ Ом;}$$

$$X_{кл1} = x_0 \cdot L = 0,085 \cdot 0,19 = 18,62 \text{ Ом.}$$

Опір котушок максимального струму автомата

$$R_{кот} = 0,1 \text{ Ом;}$$

$$X_{кот} = 0,1 \text{ Ом.}$$

Перехідний опір контактів:

$$R_{конт} = 0,15 \text{ Ом;}$$

Сумарний повний опір до точки КЗ:

$$R_{к2} = R_{mp} + R_{кл} + R_{кот} + R_{конт} = 3,2 + 118,75 + 0,1 + 0,15 = 137,4 \text{ Ом;}$$

$$X_{к2} = X_{mp} + X_{кл} + X_{кот} = 13,5 + 18,62 + 0,1 = 32,26 \text{ Ом;}$$

Сумарний повний опір до точки К2:

$$Z_{k2} = \sqrt{R_{k2}^2 + X_{k2}^2} = \sqrt{137,4^2 + 32,26^2} = 141,16 \text{ МОм}$$

Діюче значення струму КЗ:

$$I_{k2} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot Z_{k2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 141,16} = 1,18 \text{ кА}$$

Ударний струм КЗ:

$$i_y^{k2} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,18 = 1,66 \text{ кА},$$

де  $k_y$  - ударний коефіцієнт.

*Розрахунок струмів КЗ для точки КЗ:*

$$R_{кл} = r_0 \cdot L = 1,25 \cdot 0,0512 = 64 \text{ МОм};$$

$$X_{кл} = x_0 \cdot L = 0,091 \cdot 0,0512 = 4,66 \text{ МОм}.$$

Опір котушок максимального струму автомата:

$$R_{кот} = 0,1 \text{ Ом};$$

$$X_{кот} = 0,1 \text{ Ом}.$$

Перехідний опір контактів:

$$R_{конт} = 0,15 \text{ Ом};$$

Сумарний повний опір до точки КЗ:

$$R_{к3} = R_{к2} + R_{кл} + R_{кот} + R_{конт} = 137,4 + 64 + 0,1 + 0,15 = 201,68 \text{ МОм};$$

$$X_{к3} = X_{к2} + X_{кл} + X_{кот} = 32,26 + 4,66 + 0,1 = 37,02 \text{ МОм};$$

Сумарний повний опір до точки КЗ:

$$Z_{k2} = \sqrt{R_{к2}^2 + X_{к2}^2} = \sqrt{201,68^2 + 37,02^2} = 205,05 \text{ МОм}$$

Діюче значення струму КЗ:

$$I_{k2} = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot Z_{k2}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 201,68} = 1,13 \text{ кА}$$

Ударний струм КЗ:

$$i_y^{k2} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,13 = 1,59 \text{ кА},$$

де  $k_y$  - ударний коефіцієнт.



### Побудова карти селективності дії електричних апаратів захисту для ділянки ЦМ

Карту селективності будуємо для ділянки цехової мережі від ввідного автомату на підставі ТП-3 до найпотужнішого електроприймача (електропечі).

Дані для побудови карти селективності представлені в таблиці 2.15. і в таблиці 2.16.

Таблиця 2.15 - Дані для побудови карти селективності

|                       | ЕП     | ПР7    | ТП-3    | I <sub>кз</sub> в відповідних точках, кА |      |      |
|-----------------------|--------|--------|---------|------------------------------------------|------|------|
| 4                     |        |        |         | 1                                        | 2    | 3    |
| I <sub>р</sub> , А    | -      | 194.07 | 943.88  | 10.1                                     | 1.18 | 1.13 |
| I <sub>пik</sub> , А  | -      | 398.22 | 1518.19 | 10.1                                     | 1.18 | 1.13 |
| I <sub>ном</sub> , А  | 47.97  | -      |         | 10.1                                     | 1.18 | 1.13 |
| I <sub>пуск</sub> , А | 239.85 | -      |         | 10.1                                     | 1.18 | 1.13 |

Таблиця 2.16 - Дані для побудови карти селективності

| Назва апарату захисту | Номінальний струм розчеплювача, А | Номінальний струм спрацьовування вставки в зоні КЗ, А |
|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| ВА83-41 (ТП3)         | 1000,0                            | 2000,0                                                |
| ВА57-35 (ПР7)         | 200,0                             | 500,0                                                 |
| ВА51-31 (ЕП)          | 63,0                              | 472.5                                                 |