

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики**

**Кафедра автоматизації енергосистем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Денис Дерев'янка

“10” червня 2026 р.

**Дипломний проект**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою**

**«Управління, захист та автоматизація енергосистем»**

**спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

**на тему: Реконструкція релейного захисту та автоматики підстанції**

**110/35/10 кВ**

**Виконав:**

Студент IV курсу, групи ЕК-з21

Видойний Богдан Сергійович

\_\_\_\_\_

**Керівник:**

к.т.н., доцент,

Нестерко Артем Борисович

\_\_\_\_\_

**Рецензент:**

к.т.н., доцент,

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2026 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ**  
**Кафедра автоматизації енергосистем**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма – «Управління, захист та автоматизація енергосистем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

«10» червня 2026 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт студенту**

**Видойному Богдану Сергійовичу**

1. **Тема проєкту** «Реконструкція релейного захисту та автоматики підстанції 110/35/10 кВ», керівник проєкту Нестерко Артем Борисович, доц., к.т.н., затверджені наказом по університету від 26.05.2026р. №1720-с
2. **Термін подання** студентом проєкту 10 червня 2026 р.
3. **Вихідні дані до роботи:** Схема підстанції напругою 110/35/10 кВ. Матеріали науково та проектних організацій. Довідкова література. Каталоги виробників обладнання
4. **Перелік питань, які мають бути розроблені:** Аналіз схеми підстанції напругою 110/35/10 кВ та встановленого на ній обладнання. Розрахунки струмів короткого замикання на шинах підстанції. Модернізація обладнання РП 35 кВ. Релейний захист напругою РП 35 кВ.
5. Перелік графічного матеріалу 1- *схема електричних з'єднань ПС напругою 110/35/10 кВ*; 2- , 3-
7. **Дата видачі завдання** 26.05.2026 р.

### Календарний план

| № з/п | Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання | Термін виконання | Позначки керівника про виконання завдань |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------|
| 1     | Аналіз схеми та обладнання                                                      | 27.05.2026       |                                          |
| 2     | Розрахунки струмів короткого замикання                                          | 29.05.2026       |                                          |
| 3     | Дослідження схеми електричних з'єднань ПС напругою 110/35/10 кВ                 | 01.06.2026       |                                          |
| 4     | Розрахунок струмів КЗ на шинах ПС                                               | 04.06.2026       |                                          |
| 5     | Вибір типу захисту                                                              | 07.06.2026       |                                          |
| 6     | Графічна частина. Оформлення роботи                                             | 10.06.2026       |                                          |

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Богдан ВИДОЙНИЙ

Керівник

\_\_\_\_\_

(підпис)

Артем НЕСТЕРКО

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

| № з/п | Формат | Позначення         | Найменування                                       | Кількість листів | Примітка |
|-------|--------|--------------------|----------------------------------------------------|------------------|----------|
| 1     | A4     |                    | Завдання на дипломний проект                       | 1                |          |
| 2     | A4     | 141.ЕК2106.006.ДБ  | Пояснювальна записка                               | 63               |          |
| 3     | A1     | 141.ЕК2106.006.ТК1 | Головна схема електричних з'єднань ПС 110/35/10 кВ | 1                |          |
| 4     | A1     | 141.ЕК2106.006.ТК2 |                                                    | 1                |          |
| 5     | A1     | 141.ЕК2106.006.ТК3 |                                                    | 1                |          |

|           |      |                |        |      |                              |                                             |        |
|-----------|------|----------------|--------|------|------------------------------|---------------------------------------------|--------|
|           |      |                |        |      | 141.ЕК2106.006.ДБ            |                                             |        |
|           |      |                |        |      |                              |                                             |        |
| Змн.      | Арк. | № докум.       | Підпис | Дата |                              |                                             |        |
| Розроб.   |      | Видойний Б.С.  |        |      | Відомість дипломного проекту | Літ.                                        | Арк.   |
| Перевір.  |      | Нестерко А.Б.  |        |      |                              |                                             | Аркуші |
|           |      |                |        |      |                              | 4                                           | 1      |
| Н. Контр. |      | Ягельский Є.О. |        |      |                              | КПІ ім. Ігоря Сікорського<br>ФЕА, гр. ЕК-21 |        |
| Затв.     |      | Дерев'яно Д.Г. |        |      |                              |                                             |        |

**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проекту**  
**на тему: «Реконструкція релейного захисту та автоматики підстан-**  
**ції 110/35/10 кВ»**

Київ – 2026 року

## РЕФЕРАТ

Дипломний проект виконаний на 63 аркушах, 16 рисунків, 15 таблиць, 3 листи графічної частини, 20 літературних посилань.

**Актуальність теми** – Модернізація релейного захисту та автоматики підстанцій напругою 110/35/10 кВ обумовлена високим рівнем фізичного та морального зносу існуючого електромеханічного й мікроелектронного обладнання, яке вже не здатне забезпечити необхідну швидкодію, чутливість та селективність у сучасних умовах розвитку енергосистем. Упровадження передових цифрових та мікропроцесорних терміналів дозволяє радикально підвищити надійність електропостачання споживачів, мінімізувати ризики масштабних аварій та суттєво скоротити час ліквідації пошкоджень у мережі.

**Об'єкт дослідження** – Електрична мережа та підстанція з робочою напругою 110/35/10 кВ. Процес функціонування та забезпечення надійної роботи системи релейного захисту та автоматики трансформаторної підстанції з триобмотковими силовими трансформаторами вищої напруги 110 кВ, середньої напруги 35 кВ та нижчої напруги 10 кВ в умовах виникнення аварійних режимів та нормальної експлуатації розподільних електричних мереж.

**Предмет дослідження** – Процеси, методи, засоби та алгоритми роботи мікропроцесорних типів захисту на підстанціях 110/35/10 кВ.

**Мета дослідження** – Підвищення надійності, ефективності та безпеки функціонування електричної підстанції шляхом розробки технічних рішень з комплексної реконструкції системи релейного захисту та автоматики на базі сучасних цифрових мікропроцесорних терміналів замість застарілого обладнання.

**Ключові слова:** РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ, МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ТЕРМІНАЛ, АВТОМАТИКА, ТРАНСФОРМАТОРНА ПІДСТАНЦІЯ, РЕКОНСТРУКЦІЯ, СЕЛЕКТИВНІСТЬ, НАДІЙНІСТЬ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, СИСТЕМА SCADA, СТРУМ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ, ЦИФРОВІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСИСТЕМ.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 6    |

## ABSTRACT

The diploma project is made on 63 sheets, 16 figures, 15 tables, 3 sheets of graphic part, 20 literary references.

The relevance of the topic – Modernization of relay protection and automation of substations with a voltage of 110/35/10 kV is due to the high level of physical and moral wear and tear of existing electromechanical and microelectronic equipment, which is no longer able to provide the necessary speed, sensitivity and selectivity in modern conditions of development of power systems. The introduction of advanced digital and microprocessor terminals allows to radically increase the reliability of power supply to consumers, minimize the risks of large-scale accidents and significantly reduce the time for eliminating damage in the network.

The object of research – Electrical network and substation with an operating voltage of 110/35/10 kV. The process of functioning and ensuring reliable operation of the relay protection and automation system of a transformer substation with three-winding power transformers of higher voltage 110 kV, medium voltage 35 kV and lower voltage 10 kV in conditions of emergency modes and normal operation of distribution electric networks.

Subject of research – Processes, methods, means and algorithms of automatic voltage regulation and reactive power compensation at 110/35/10 kV substations as part of distribution electric networks.

Purpose of research – Increasing the reliability, efficiency and safety of the operation of an electric substation by developing technical solutions for the comprehensive reconstruction of the relay protection and automation system based on modern digital microprocessor terminals instead of outdated equipment.

Keywords: RELAY PROTECTION, MICROPROCESSOR TERMINAL, AUTOMATION, TRANSFORMER SUBSTATION, RECONSTRUCTION, SELECTIVITY, POWER SUPPLY RELIABILITY, SCADA SYSTEM, SHORT-CIRCUIT CURRENT, DIGITISATION OF POWER SYSTEMS.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 7    |

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Перелік умовних скорочень.....                                                                                                  | 9  |
| Вступ.....                                                                                                                      | 10 |
| 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ РЕ-<br>КОНСТРУКЦІЇ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ .....                               | 13 |
| 1.1 Призначення та технічна характеристика підстанції у структурі енергосис-<br>теми .....                                      | 13 |
| 1.2 Аналіз існуючого стану пристроїв релейного захисту та автоматики об'єкта<br>.....                                           | 16 |
| 1.3 Огляд сучасних тенденцій розвитку та мікропроцесорних технічних засобів<br>захисту.....                                     | 15 |
| 1.4 Система SCADA .....                                                                                                         | 18 |
| 1.5 Інтеграція систем релейного захисту та комерційного обліку електроенергії в<br>єдиний інформаційний простір підстанції..... | 21 |
| Висновки до розділу 1.....                                                                                                      | 24 |
| 2 ПІДСТАНЦІЯ 110/35/10 КВ ЯК ОСНОВНИЙ ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ.....                                                                   | 26 |
| 2.1 Загальний опис обладнання.....                                                                                              | 26 |
| 2.2 Основні трансформатори .....                                                                                                | 27 |
| 2.3 Збірні шини РУ підстанції .....                                                                                             | 28 |
| 2.4 Комутаційне обладнання розподільних пристроїв.....                                                                          | 29 |
| 2.5 Захисне обладнання.....                                                                                                     | 31 |
| 2.6 Вимірювальні трансформатори струму та напруги.....                                                                          | 32 |
| 2.7 Вимірювальні прилади підстанції.....                                                                                        | 34 |
| 2.8 Система власних потреб .....                                                                                                | 35 |
| 2.9 Розрахунок струмів КЗ .....                                                                                                 | 36 |
| Висновки до розділу 2.....                                                                                                      | 39 |
| 3. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З РЕКОНСТРУКЦІЇ РЗА ТА ВИБІР МІКРО-<br>ПРОЦЕСОРНОГО ОБЛАДНАННЯ .....                               | 41 |
| 3.1 Обґрунтування структури та функціонального складу оновленого комплексу<br>РЗА .....                                         | 41 |

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 8    |

|                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.2 Модернізація захисту триобмоткових силових трансформаторів на базі ABB RET670 ..... | 46 |
| 3.3 Інтеграція технологічних захистів трансформатора .....                              | 52 |
| 3.4 Комунікаційні можливості та цифрова інтеграція за стандартом IEC 6185054            |    |
| Висновки до розділу 3.....                                                              | 58 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                           | 60 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....                                                           | 62 |

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 9    |

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АВР – автоматичний ввід резерву;  
ВН – висока напруга;  
ВТ – вимірювальний трансформатор;  
ВРП – відкритий розподільчий пристрій;  
ЗРП – розподільчий пристрій закритого типу;  
КЗ – коротке замикання;  
КМ – кабельна мережа;  
КРУ – комплектна розподільча установка;  
ЛЕП – лінії електропередачі;  
МСЗ – максимальний струмовий захист;  
НН – низька напруга;  
ПЛ- повітряні лінії;  
ПС – підстанція;  
ПУЕ – правила улаштування електроустановок;  
РЗ – релейний захист;  
РЗА – релейний захист та автоматика;  
СВ – струмова відсічка;  
СК – синхронний компенсатор;  
ТН – трансформатор напруги;  
ТС – трансформатор струму.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 10   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

## ВСТУП

Більшість діючих вузлових підстанцій напругою 110/35/10 кВ побудовані кілька десятиліть тому і на сьогодні експлуатуються із застарілими комплексами захисту, які повністю вичерпали свій нормативний, моральний та фізичний ресурс, потребують значних експлуатаційних витрат і не спроможні повноцінно інтегруватися в сучасні цифрові системи диспетчерського керування. Реконструкція та переведення релейного захисту на новітню елементну базу дозволяє не лише ліквідувати ризики хибних чи зайвих спрацювань, а й забезпечити максимально високу швидкість відімкнення пошкоджених ділянок мережі для збереження динамічної стійкості всієї суміжної енергосистеми.

Особлива значущість підстанцій з триобмотковими силовими трансформаторами та рівнями напруги 110, 35 та 10 кВ полягає в їхній унікальній специфіці як ключових транзитних, системних та розподільних вузлів, що безпосередньо пов'язують магістральні високовольтні лінії електропередачі з великими регіональними, промисловими та комунальними споживачами.

Напруга вищого ступеня 110 кВ зазвичай виконує функцію безпосереднього живлення об'єкта та транзиту потужності між різними районами енергосистеми, відкритий розподільний пристрій 35 кВ забезпечує передачу та розподіл енергії для віддалених сільськогосподарських підприємств, локальних виробництв чи районних розподільних мереж, а закритий розподільний пристрій 10 кВ безпосередньо розподіляє електричну потужність між міськими споживачами, об'єктами критичної інфраструктури та побутовим сектором.

Впровадження цифрових мікропроцесорних терміналів на таких складноструктурованих вузлових об'єктах є обов'язковим та безальтернативним кроком на шляху до загальної цифровізації галузі, створення інтелектуальних електричних мереж та активного впровадження автоматизованих систем диспетчерського керування нового покоління.

Новітні мікропроцесорні пристрої інтегрують у своєму єдиному апаратному корпусі функції релейного захисту, протиаварійної та режимної автоматики, комерційного та технічного вимірювання параметрів мережі, осцилографування та

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 11   |

реєстрації аварійних подій, а також безперервного дистанційного моніторингу стану комутаційних апаратів, що дозволяє суттєво спростити поточну експлуатацію підстанції та мінімізувати ймовірність помилок оперативного персоналу.

У межах даної дипломної роботи передбачено виконання детального комплексного аналізу існуючого схематичного та апаратного виконання підстанції, проведення повних розрахунків параметрів струмів короткого замикання для різних режимів роботи системи, а також науково-технічне обґрунтування вибору сучасних комплексів захисту для силових триобмоткових трансформаторів та ліній електропередачі усіх трьох класів напруги.

Практична цінність та інженерна значущість отриманих результатів полягає у розробці комплексних, скоординованих технічних рішень, які забезпечують високоселективну роботу автоматики, зводять до мінімуму аварійні простої обладнання, виключають недовідпуск електричної енергії споживачам та оптимізують загальні капітальні витрати на обслуговування обладнання підстанції.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 12   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

# 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ РЕКОНСТРУКЦІЇ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

## 1.1 Призначення та технічна характеристика підстанції у структурі енергосистеми

Розглянута трансформаторна підстанція напругою 110/35/10 кВ (рис.1.1) виконує функцію важливого опорного та розподільного пункту, який забезпечує перетоки потужності в магістральних лініях та безпосереднє живлення кінцевих споживачів регіону. У загальній структурі об'єднаної енергосистеми об'єкт є зв'язуючою ланкою між високовольтними мережами вищого класу напруги та регіональними розподільними мережами середнього й нижчого рівнів.

Напруга вищого ступеня 110 кВ слугує для приймання електричної енергії від генеруючих джерел або інших вузлових підстанцій та її транзиту через повітряні лінії електропередачі. Розподільний пристрій середньої напруги 35 кВ призначений для передачі потужності до менших районних підстанцій, віддалених промислових майданчиків та сільськогосподарських підприємств. Через відкритий або закритий розподільний пристрій нижчої напруги 10 кВ здійснюється безпосереднє електропостачання міської комунальної інфраструктури, побутового сектору та локальних виробничих потужностей.

Технічна характеристика підстанції визначається параметрами встановленого силового та комутаційного обладнання, яке безпосередньо впливає на пропускну здатність та режими роботи всього вузла. Основними елементами об'єкта є два триобмоткові силові трансформатори з можливістю регулювання напруги під навантаженням, що дозволяє підтримувати стабільні показники якості електроенергії у суміжних мережах. Схема електричних з'єднань на стороні 110 кВ зазвичай виконується за принципом містка або блокових схем з вимикачами, що гарантує гнучкість комутацій та надійність транзитних перетоків.

|           |      |                 |        |      |                                                                                                 |                                                |      |         |
|-----------|------|-----------------|--------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------|---------|
|           |      |                 |        |      | 141.EK2106.006.ДБ                                                                               |                                                |      |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.        | Підпис | Дата |                                                                                                 |                                                |      |         |
| Розроб.   |      | Видойний Б.С.   |        |      | АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ<br>ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НЕОБ-<br>ХІДНОСТІ РЕКОНСТРУКЦІЇ<br>РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ | Лім.                                           | Арк. | Аркушів |
| Перевір.  |      | Нестерко А.Б.   |        |      |                                                                                                 |                                                | 13   | 34      |
|           |      |                 |        |      |                                                                                                 | КПІ ім. Ігоря<br>Сікорського<br>ФЕА, гр. ЕК-21 |      |         |
| Н. Контр. |      | Ягельський Є.О. |        |      |                                                                                                 |                                                |      |         |
| Затв.     |      | Дерев'яно Д.Г.  |        |      |                                                                                                 |                                                |      |         |

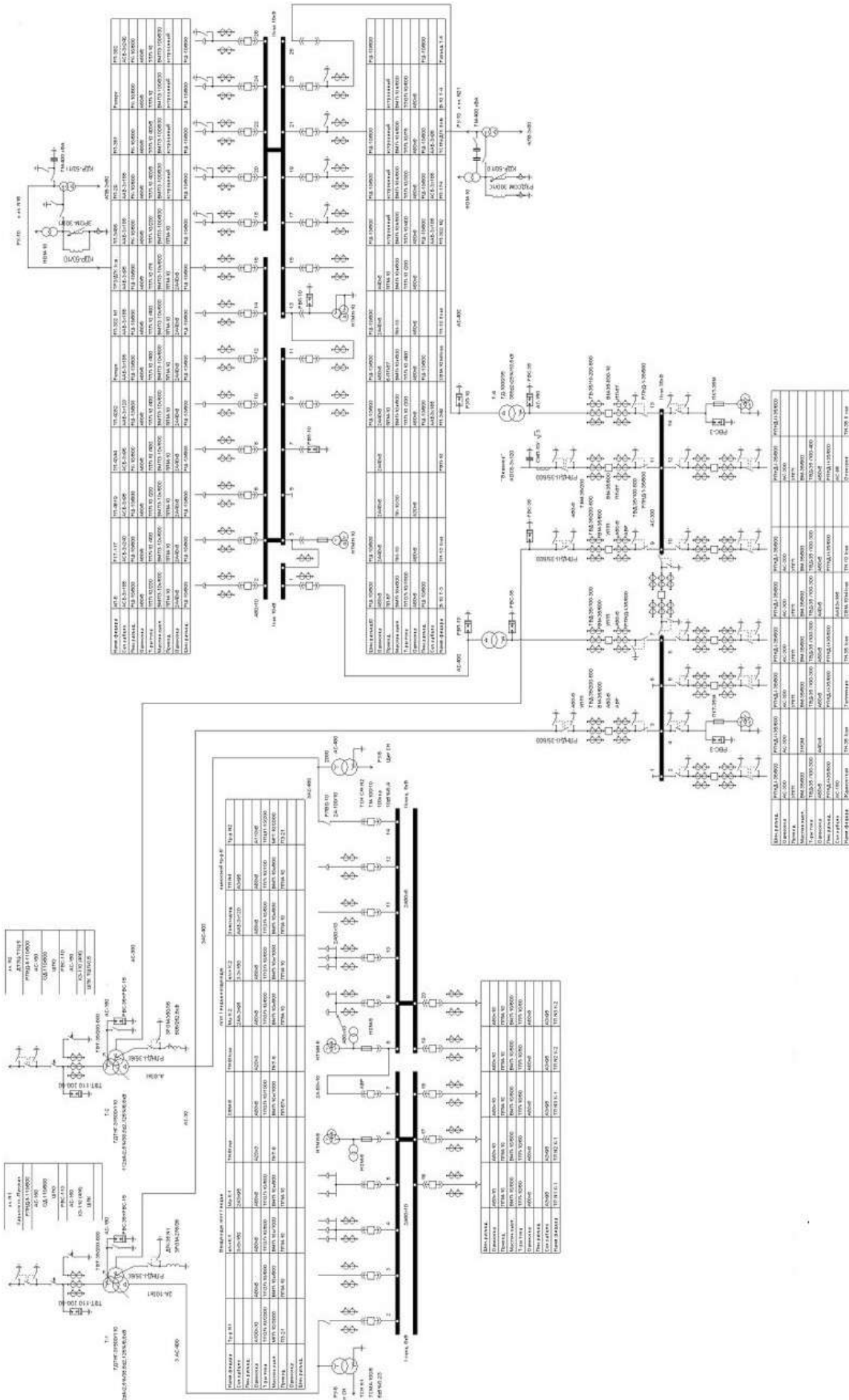


Рисунок 1.1 – Схема електричної підстанції напругою 110/35/10 кВ

Розподільні пристрої 35 та 10 кВ обладнані системами збірних шин із секційними вимикачами, які забезпечують секціонування навантаження та локалізацію пошкоджених ділянок мережі. Особливістю даного об'єкта є функціонування мереж із різними режимами заземлення нейтралі, оскільки сторона 110 кВ працює у режимі ефективно глухозаземленої нейтралі, а мережі 35 та 10 кВ функціонують з ізольованою або компенсованою через дугогасні реактори нейтраллю.

## **1.2 Аналіз існуючого стану пристроїв релейного захисту та автоматики об'єкта**

Для формування детальної технічної бази майбутньої реконструкції необхідно чітко визначити конкретні типи застарілого обладнання, що наразі експлуатується на об'єкті, та відповідні сучасні мікропроцесорні аналоги для їх повної заміни. Для основного силового обладнання підстанції, а саме триобмоткових трансформаторів потужністю, існуючий захист виконано на базі диференційного реле серії РНТ-565 або ДЗТ-11, які забезпечують відсічку від внутрішніх пошкоджень, а резервні захисти від зовнішніх замикань та перевантажень реалізовано на електромеханічних реле струму серії РТ-40 та реле часу РВ-100. У наступних розділах цей застарілий комплекс буде повністю замінено на єдиний багатофункціональний мікропроцесорний термінал захисту трансформатора, який в одному корпусі об'єднує поздовжній диференційний захист, газовий захист, максимальний струмовий захист з комбінованим пуском за напругою та автоматику керування пристроєм регулювання під навантаженням РПН.

На лініях електропередачі вищого класу напруги 110 кВ діючий захист представлений панелями дистанційного захисту типу ПЗ-2 або ПЗ-5 та панелями спрямованого захисту нульової послідовності типу ЗЗП-1, які мають складну кінематичну схему та велику кількість контактів. Модернізація передбачає впровадження замість цих громіздких панелей сучасних інтегрованих терміналів дистанційного та струмового захисту ліній типу РЗА-ЛІНІЯ-110 або мікропроцесорних шаф захисту лінії із вбудованими функціями автоматичного повторного ввімкнення АПВ та пристрою резервування відмов вимикачів ПРВВ. Для ліній

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 15   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

середньої напруги 35 кВ, де зараз працюють двофазні двопристроєві схеми на базі індукційних реле струму РТ-80 або РТ-90, заплановано перехід на компактні цифрові блоки захисту фідерів типу РЗА-ЛПНІЯ-35, які забезпечують триступеневий максимальний струмовий захист та точне визначення місця пошкодження лінії.

У закритому розподільному пристрої нижчої напруги 10 кВ захист відхідних ліній, секційних та ввідних вимикачів зараз побудований на реле серій РТ-40, РТ-80 та реле напруги РН-53, монтованих у релейних відсіках комірок КРУ. Ця розгалужена електромеханічна схема буде демонтована та замінена на сучасні малогабаритні мікропроцесорні термінали захисту приєднань 10 кВ типу РЗА-10 або аналогічні блоки, які встановлені безпосередньо на дверцятах релейних шаф комірок.

Для захисту збірних шин 10 кВ від дугових замикань замість ненадійних клапанних або фоторелейних систем буде впроваджено сучасний волоконно-оптичний захист від дугових замикань типу ДУГА, що миттєво реагує на світловий спалах дуги всередині відсіків. Такий чіткий перелік заміни дозволить у подальших розрахунках перейти від індивідуального налаштування десятків окремих реле до комплексного програмування логіки та уставки кількох інтегрованих мікропроцесорних комплексів.

### **1.3 Огляд сучасних тенденцій розвитку та мікропроцесорних технічних засобів захисту**

Сучасний етап розвитку світової та вітчизняної електроенергетики характеризується повним переходом від аналогових принципів обробки інформації до концепції інтелектуальних цифрових підстанцій та автоматизованих мереж Smart Grid. Основним вектором модернізації систем релейного захисту є повна відмова від використання індивідуальних електромеханічних чи мікроелектронних реле на користь інтегрованих мікропроцесорних терміналів, які поєднують у собі функції захисту, автоматики, керування, вимірювання параметрів та цифрового осцилографування.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 16   |

Головною тенденцією розвитку таких пристроїв є підвищення їхньої обчислювальної здатності, впровадження складних адаптивних алгоритмів, які здатні підлаштовувати уставки під поточний режим роботи мережі, а також реалізація безперервної глибокої самодіагностики апаратних та програмних засобів, що майже повністю виключає ризик виникнення прихованих відмов захисту.

Технологічною основою для побудови сучасних комплексів захисту став міжнародний стандарт IEC 61850 (рис.1.2), який визначає єдині вимоги до архітектури зв'язку, протоколів передачі даних та моделей інформаційного обміну між пристроями різних виробників.

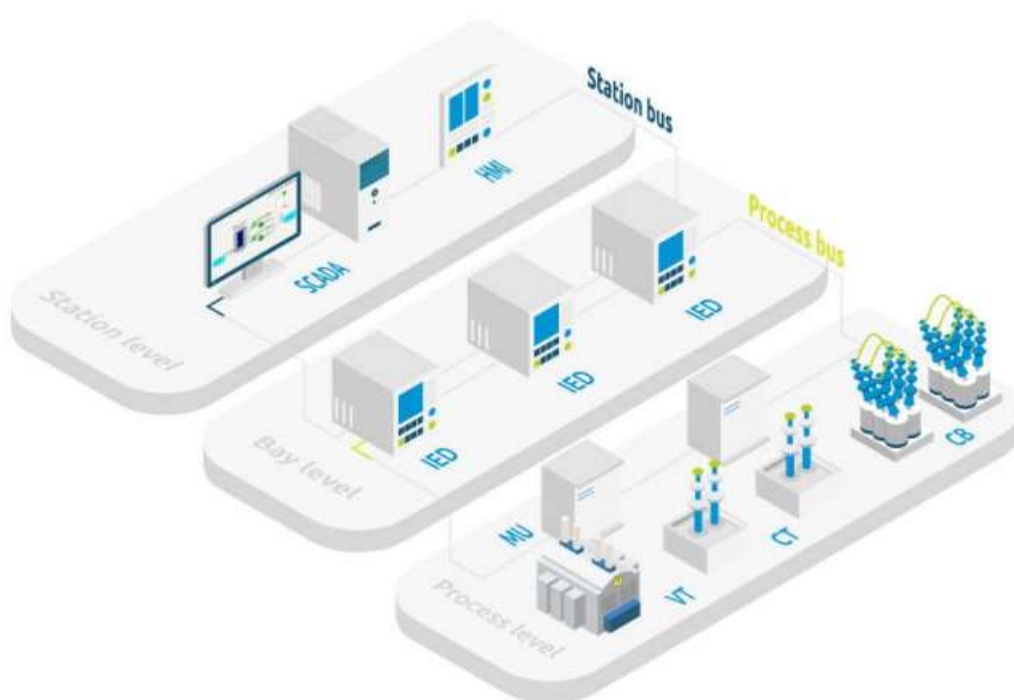


Рисунок 1.2 - Архітектура IEC 61850

Основна концепція стандарту IEC 61850 полягає в оптимізації вторинних кіл підстанції шляхом повної заміни традиційних багатожильних мідних кабелів на високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку із розподіленням архітектури на три функціональні рівні.

Перехід на цифрові канали зв'язку та використання волоконно-оптичних ліній дозволяє замінити традиційні громіздкі мідні кабельні зв'язки вторинних кіл на високошвидкісні інформаційні шини процесу Process Bus та шини підста-

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 17   |

нції Station Bus. Обмін інформацією про аварійні події між окремими терміналами здійснюється за допомогою миттєвих цифрових GOOSE-повідомлень, а передача виміряних миттєвих значень струмів та напруг від цифрових трансформаторів реалізується через потоки SV-значень, що гарантує максимальну швидкість та захищеність від електромагнітних завад під час ліквідації найважчих коротких замикань.

Застосування мікропроцесорних технічних засобів на підстанціях 110/35/10 кВ дозволяє кардинально змінити підходи до організації захисту триобмоткових силових трансформаторів та ліній електропередачі завдяки високій точності цифрової фільтрації сигналів та стабільності характеристик у часі. Завдяки гнучкому програмному забезпеченню інженер-проектувальник має можливість вільно налаштовувати внутрішню логіку терміналу, створювати додаткові блоки блокування чи пуску та легко інтегрувати пристрої в єдину автоматизовану систему диспетчерського керування SCADA верхнього рівня.

#### 1.4 Система SCADA

Особливе місце в процесі комплексної модернізації системи релейного захисту та автоматики підстанції 110/35/10 кВ посідає впровадження автоматизованої системи диспетчерського керування та збору даних SCADA, яка формує сучасний верхній рівень інформаційної структури об'єкта. Завдяки повній заміні застарілих електромеханічних реле на мікропроцесорні термінали з підтримкою цифрових інтерфейсів з'являється можливість збору всієї технологічної інформації в єдиному центрі обробки даних у режимі реального часу.

Система SCADA здійснює безперервний моніторинг поточних режимів роботи підстанції, зчитує з цифрових блоків значення струмів, напруг, активної та реактивної потужності, а також миттєво фіксує зміну положення високовольтних вимикачів, роз'єднувачів та заземлювальних ножів. Це дозволяє повністю відмовитися від ручного фіксування подій за допомогою механічних вказальних реле на користь автоматичного ведення електронних журналів тривог та реєстрації аварійних процесів.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 18   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

Інтеграція мікропроцесорних комплексів захисту силових трансформаторів та ліній електропередачі до системи SCADA реалізується на базі промислових серверів зв'язку та локальної обчислювальної мережі підстанції з використанням високошвидкісних волоконно-оптичних ліній. Основним інструментом взаємодії оперативного персоналу з обладнанням стає автоматизоване робоче місце диспетчера, на екрані якого відображається динамічна мнемосхема підстанції з актуальним станом комутаційних апаратів та поточними параметрами мережі.

У разі виникнення аварійної ситуації або спрацювання будь-якого ступеня захисту система SCADA миттєво активує світлову та звукову сигналізацію, відображає точний час та причину відключення, а також автоматично зчитує та архівує осцилограми аварійних подій з терміналів для їх подальшого детального аналізу інженерами. Окрім інформаційних функцій, цифровий верхній рівень дозволяє здійснювати безпечне дистанційне керування вимикачами, змінювати групи уставок мікропроцесорних реле без безпосереднього доступу до шаф захисту та оперативно координувати роботу протиаварійної автоматики підстанції.

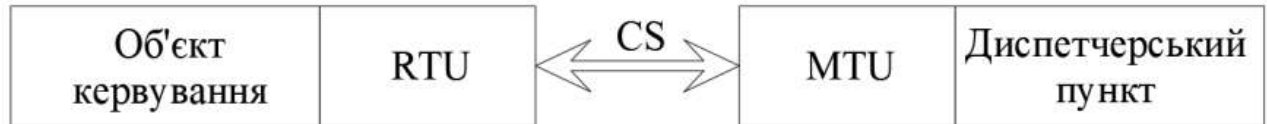


Рисунок 1.3 – Загальна структура SCADA

Remote Terminal Unit (RTU) – периферійний мікропроцесорний пристрій, цей апаратний модуль підстанційного рівня здійснює безпосереднє зчитування аналогових сигналів вимірювань струму чи напруги та дискретних сигналів положення високовольтних вимикачів підстанції з подальшим їх перетворенням у цифровий код для відправки по каналах зв'язку на верхній рівень до головного сервера. Пристрій також приймає цифрові команди телекерування від диспетчера і перетворює їх на фізичні сигнали замикання вихідних реле для безпосереднього приведення в дію приводів комутаційних апаратів ліній та силових триобмоткових трансформаторів. Впровадження таких блоків дозволяє автоматизувати процес збору первинних даних та забезпечує надійне сполучення між силовими колами високої напруги та інформаційною мережею автоматизованої системи керування.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 19   |

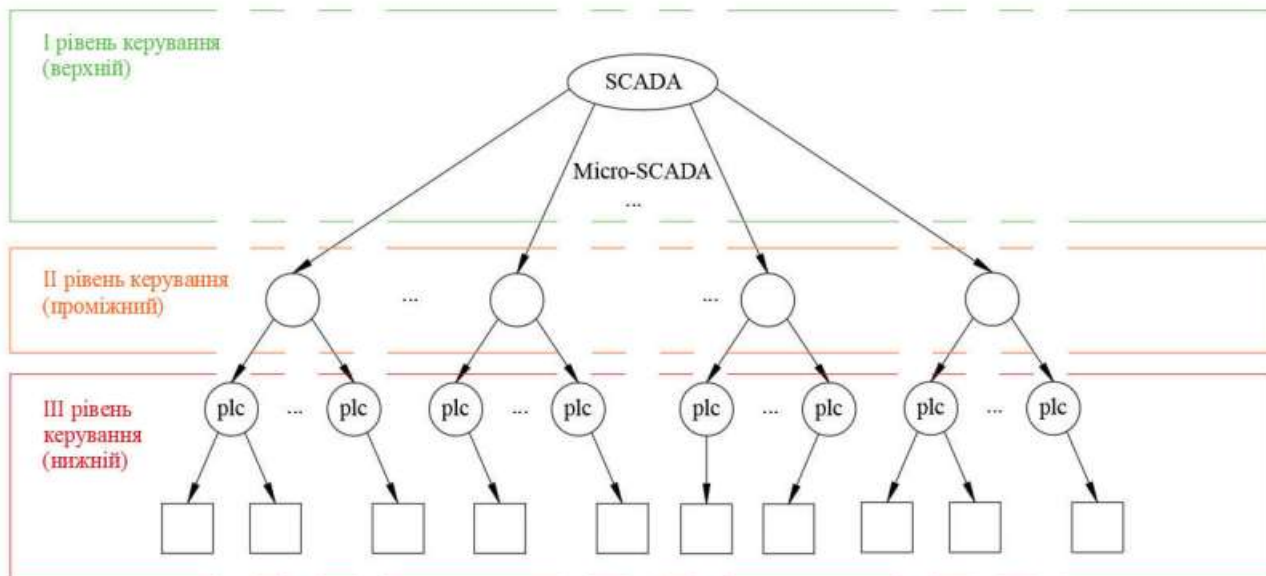


Рисунок 1.4 – Архітектура систем SCADA

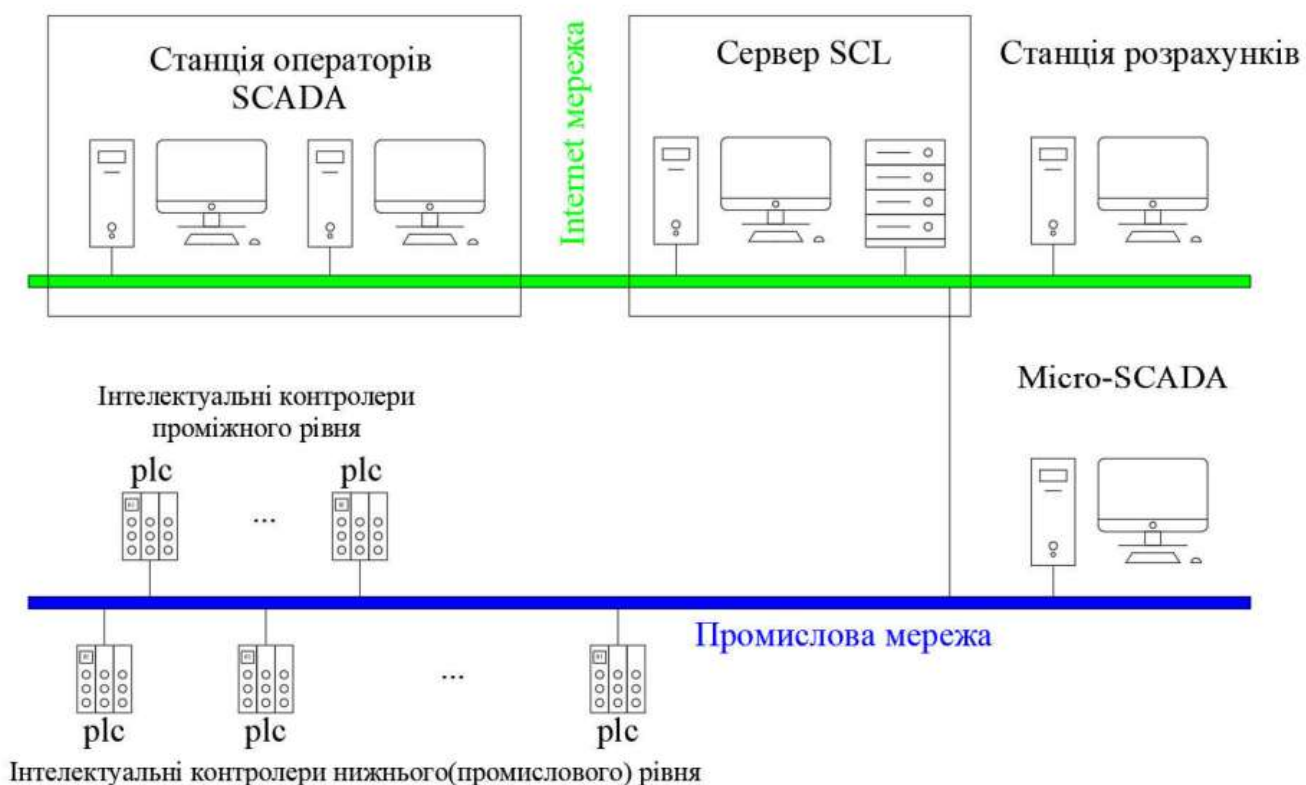


Рисунок 1.5 - Архітектура систем SCADA

Master Terminal Unit (MTU) це головний обчислювальний комплекс, що координує роботу всієї системи автоматизації. Цей центральний пристрій виконує функцію головного диспетчера обчислювальної мережі підстанції який здійснює періодичний або спорадичний опис усіх периферійних контролерів нижнього рівня обробляє отримані масиви інформації та проводить комплексний аналіз поточного

режиму роботи електричної мережі. На основі закладених математичних алгоритмів програмного забезпечення та безпосередніх дій оперативного персоналу цей комплекс формує загальні директиви керування для віддалених терміналів а також забезпечує повну візуалізацію всього технологічного процесу трансформації та розподілу енергії на моніторах автоматизованих робочих місць. Функціонування цього сервера дозволяє централізовано накопичувати архівні дані про роботу релейного захисту вести електронні журнали подій та координувати протиаварійні дії в межах усього енергетичного об'єкта.

Communication System (CS) - сукупність апаратних та програмних засобів передачі даних. Це середовище обміну інформацією будується на базі волоконно-оптичних ліній зв'язку або екранованих кабелів із використанням промислових комутаторів, маршрутизаторів та стандартних цифрових протоколів передачі даних. Дана система виконує роль сполучного інфраструктурного ланцюга, який забезпечує миттєву доставку вимірних параметрів мережі та сигналів про роботу релейного захисту від віддалених терміналів до центрального пульта керування. Надійна та високошвидкісна робота каналів зв'язку гарантує мінімальну затримку при передачі команд телекерування від диспетчера назад до виконавчих механізмів, забезпечуючи високу ефективність протиаварійної автоматики та загальну живучість підстанції в будь-яких режимах роботи.

### **1.5 Інтеграція систем релейного захисту та комерційного обліку електроенергії в єдиний інформаційний простір підстанції**

Донедавна підсистеми релейного захисту та автоматики (РЗА) та автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) будувалися як незалежні вертикальні структури з власними вимірювальними колами, кабельною інфраструктурою та протоколами обміну. Проте техніко-економічні вимоги до модернізації підстанцій 110/35/10 кВ диктують необхідність їх об'єднання в єдиний інформаційний простір енергооб'єкта.

Головною фізичною перешкодою на шляху інтеграції систем завжди були принципово різні вимоги до первинних вимірювальних каналів — трансформаторів струму (ТС) та напруги (ТН).

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 21   |

Для релейного захисту визначальним критерієм є надійна робота в аварійних режимах при коротких замиканнях (КЗ), коли струми в рази перевищують номінальні значення. Обмотки ТС для РЗА (класів точності 10Р або 5Р) проектуються так, щоб не насичуватися при значних кратностях струмів КЗ, забезпечуючи правильну роботу захистів. Натомість для систем обліку ключовим є прецизійна точність у нормальних робочих режимах підстанції. Обмотки ТС для АСКОВЕ (класів 0,2S або 0,5S) мають високу лінійність у діапазоні від 1% до 120% від номінального струму, але швидко насичуються при перевантаженнях, щоб захистити чутливі мікропроцесорні плати лічильників від вигорання при КЗ.

Аналогічна ситуація спостерігається і в колах ТН, де для обліку потрібен мінімальний спад напруги у вторинному кабелі (клас 0,2 або 0,5), а для РЗА важлива стійкість до ферорезонансних явищ та перенапруг.

Через ці фундаментальні метрологічні розбіжності безпосереднє об'єднання аналогових вторинних кіл РЗА та обліку є неможливим. Інтеграція здійснюється на вищому — інформаційному (цифровому) рівні.

Мікропроцесорні пристрої РЗА та сучасні багатофункціональні лічильники електроенергії є потужними обчислювальними елементами, що володіють розвиненими комунікаційними можливостями. Інтеграція цих пристроїв в єдину локальну обчислювальну мережу (ЛІОМ) підстанції дозволяє вирішити комплекс важливих технологічних завдань:

Оптимізація кабельного господарства: Замість прокладання кілометрів контрольних мідних кабелів від кожного пристрою до загальнопідстанційного пункту керування (ЗПК) дані зчитуються через локальні цифрові шини зв'язку (RS-485 або Industrial Ethernet) за допомогою крученої пари чи волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Створення єдиного сервісного інструменту (SCADA-системи): Інформація про поточні режими роботи, навантаження, вектори струмів і напруг з мікропроцесорних реле захисту та комерційних лічильників зводиться на сервер SCADA підстанції. Це дає диспетчеру повну та оперативно достовірну картину стану об'єкта.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 22   |

АСКОЕ як частина ПС показана на рис.1.6.

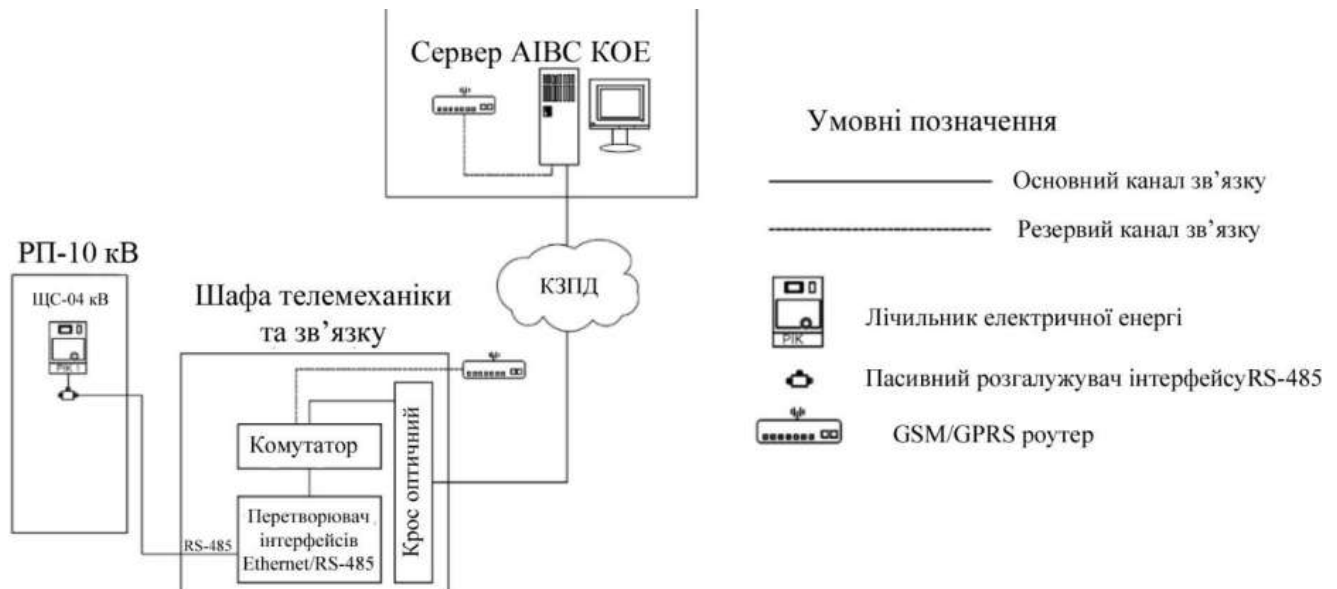


Рисунок 1.6 – Структурна схема АСКОЕ як частини ПС

Взаємне верифікування та дублювання даних: Поточні значення потужності, струмів та напруг, що вимірюються терміналами РЗА для технологічних потреб, можуть порівнюватися в автоматичному режимі з даними лічильників АСКОЕ. При виявленні критичних розбіжностей система сигналізує про можливу несправність вимірювальних кіл або трансформаторів, підвищуючи надійність моніторингу.

Гнучкий контроль якості електроенергії: Сучасні лічильники високого класу точності фіксують провали напруги, гармонічні спотворення та перенапруги. Поєднання цих даних у часі з журналами подій та осцилограмами терміналів РЗА дозволяє детально аналізувати причини аварійних ситуацій та процеси розвитку КЗ в мережі.

Основним інструментом створення такого інтегрованого простору є використання уніфікованих промислових протоколів передачі даних. Якщо на рівні АСКОЕ традиційно використовуються специфічні протоколи (DLMS/COSEM, MEK 60870-5-102), то на рівні середнього об'єктного обладнання (ПЗПД, шлюзи) ці дані конвертуються в стандартні протоколи верхнього рівня, такі як Modbus TCP або MEK 60870-5-104, які є базовими для систем SCADA.

Найбільш перспективним і повним технічним рішенням для інтеграції є впровадження міжнародного стандарту IEC 61850. У межах "цифрової підстанції"

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 23   |

аналогові сигнали від оптичних вимірювальних трансформаторів оцифровуються безпосередньо у високовольтних комірках пристроями сполучення з об'єктом (Merging Units) і транслуються у вигляді цифрових потоків Sampled Values (SV) у спільну оптичну шину процесу (Process Bus). З цієї цифрової шини дані одночасно і без взаємного метрологічного впливу приймаються як терміналами РЗА, так і цифровими лічильниками електроенергії.

Таким чином, інтеграція систем РЗА та комерційного обліку електроенергії в єдиний інформаційний простір підстанції дозволяє кардинально знизити капітальні витрати на будівництво та модернізацію вторинних кіл, підвищує інформативність та надійність експлуатації електрообладнання, усуває надлишковість апаратних засобів і створює гнучку платформу для повної автоматизації технологічних процесів на об'єкті.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ

Проведений у першому розділі комплексний аналіз технічного стану та умов експлуатації підстанції напругою 110/35/10 кВ дозволив повністю обґрунтувати необхідність та невідкладність проведення масштабної реконструкції системи її релейного захисту та автоматики. Встановлено, що діючий комплекс захисних пристроїв, який базується на застарілих електромеханічних реле серій РНТ-565, ДЗТ-11, РТ-40 та громіздких аналогових панелях типу ПЗ-2 і ЗЗП-1, повністю вичерпав свій нормативний та фізичний ресурс. Подальше використання цього обладнання створює критичні ризики для енергосистеми через його незадовільну швидкодію, схильність до дрейфу уставок під впливом зовнішніх факторів, високу ймовірність прихованих відмов та повну відсутність функцій самодіагностики, що суттєво знижує загальну надійність електропостачання споживачів.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 24   |

Огляд сучасних тенденцій розвитку електроенергетичної галузі чітко вказує на те, що єдиним ефективним шляхом вирішення виявлених проблем є повний перехід на цифрові мікропроцесорні термінали та впровадження стандартів серії IEC 61850. Сформовано чітку стратегію модернізації об'єкта, яка передбачає заміну застарілих реле на сучасні багатофункціональні цифрові блоки захисту фідерів, трансформаторів та ліній електропередачі, а також інтеграцію нових пристроїв у єдину інформаційну мережу підстанції під керуванням системи SCADA. Реалізація цих технічних рішень у наступних розділах роботи дозволить забезпечити максимально високу швидкість та селективність ліквідації аварійних режимів, автоматизувати збір інформації та звести до мінімуму ймовірність помилок оперативного персоналу підстанції.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 25   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

## 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЇ

### 2.1 Загальний опис обладнання

Основне обладнання підстанції напругою 110/35/10 кВ формує технологічний скелет для приймання, перетворення та подальшого розподілу електричної енергії між споживачами різних категорій. На стороні вищої напруги 110 кВ встановлені високовольтні вимикачі, які забезпечують комутацію кіл у нормальних режимах та миттєве знеструмлення пошкоджених ділянок при виникненні аварій, а також триполюсні роз'єднувачі з заземлювальними ножами для створення видимого розриву колій під час ремонтних робіт.

Головними силовими елементами об'єкта виступають триобмоткові трансформатори, які знижують напругу зі 110 кВ до середнього рівня 35 кВ та нижчого рівня 10 кВ, причому вони обов'язково оснащуються автоматичними пристроями регулювання під навантаженням РПН для стабілізації напруги у споживачів. Для вимірювання параметрів мережі та живлення ланцюгів релейного захисту на кожній системі шин і приєднаннях монтуються вимірювальні трансформатори струму та напруги відповідного класу ізоляції.

На стороні середньої напруги 35 кВ обладнання компонується у вигляді відкритого розподільного пристрою ВРП-35 або закритих комірок, де застосовуються сучасні вакуумні вимикачі, що відрізняються високим комутаційним ресурсом та екологічною безпекою. Розподільний пристрій нижчої напруги 10 кВ зазвичай виконується у вигляді закритої шафної структури КРУ з викатними елементами, що дозволяє суттєво зменшити габарити будівлі підстанції та спростити обслуговування.

Оскільки мережі 35 та 10 кВ працюють із ізольованою або компенсованою нейтраллю, у цих розподільних пристроях додатково встановлені заземлювальні дугогасні реактори або резистори для обмеження струмів однофазного замикання на землю.

|           |      |                |        |      |                                   |                                             |         |
|-----------|------|----------------|--------|------|-----------------------------------|---------------------------------------------|---------|
|           |      |                |        |      | 141.EK2106.006.ДБ                 |                                             |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.       | Підпис | Дата |                                   |                                             |         |
| Розроб.   |      | Видойний Б.С.  |        |      | ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЇ | Літ.                                        | Арк.    |
| Перевір.  |      | Нестерко А.Б.  |        |      |                                   |                                             | Аркушів |
|           |      |                |        |      |                                   |                                             | 26      |
| Н. Контр. |      | Ягельский Є.О. |        |      |                                   | КПІ ім. Ігоря Сікорського<br>ФЕА, гр. ЕК-21 |         |
| Затв.     |      | Дерев'яно Д.Г. |        |      |                                   |                                             |         |
|           |      |                |        |      |                                   |                                             | 18      |

Захист усієї підстанційної ізоляції від грозових та комутаційних перенапруг забезпечується встановленням нелінійних обмежувачів перенапруги ОПН, які монтуються безпосередньо на вводах ліній та поблизу нейтралей силових трансформаторів.

## 2.2 Основні трансформатори

На підстанції встановлено два трифазні триобмоткові силові трансформатори типу ТДТН-40000/110 з природною циркуляцією оливи та примусовим обдувом повітрям, які забезпечують одночасний розподіл потужності між мережами трьох класів напруги. Номінальна потужність кожного трансформатора становить 40 МВА (табл.2.1).

Для підтримки стабільних показників якості електроенергії у суміжних мережах трансформатор обладнано швидкісним перемикаючим пристроєм РПН з боку обмотки 110 кВ, який дозволяє регулювати напругу під навантаженням в автоматичному режимі без переривання живлення споживачів. На стороні середньої напруги 35 кВ додатково передбачено можливість перемикання відгалужень без збудження ПБВ, яке здійснюється вручну при повному відключенні трансформатора для сезонного коригування рівнів напруги.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики ТДТН-40000/110

| Потужність, кВА | Номінальна напруга, кВ |      |    | Втрати, кВт |     | Напруга КЗ, % |       |       | Струм ХХ, % |
|-----------------|------------------------|------|----|-------------|-----|---------------|-------|-------|-------------|
|                 | ВН                     | СН   | НН | ХХ          | КЗ  | ВН-СН         | ВН-НН | СН-НН |             |
| 40000           | 115                    | 38,5 | 11 | 40          | 170 | 17            | 10,5  | 6,5   | 0,55        |

РП 35 на 10 кВ з'єднані трансформаторами ТД-10000/35. Силовий двообмотковий трансформатор типу ТД-10000/35 є трифазним герметичним масляним навантажувальним агрегатом з природною циркуляцією оливи та примусовим обдувом повітрям радіаторних батарей за допомогою вентиляторів. Дане електротехнічне обладнання призначене для ефективного зниження напруги в розподільних мережах з тридцяти п'яти кіловольт до номінального рівня шість чи десять кіловольт з

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 27   |

метою безпосереднього живлення промислових об'єктів та ліній сільськогосподарських споживачів.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики ТД-10000/35

| Потужність,<br>кВА | Номинальна на-<br>пруга, кВ |    | Втрати,<br>кВт |    | Напруга КЗ,<br>% | Струм ХХ,<br>% |
|--------------------|-----------------------------|----|----------------|----|------------------|----------------|
|                    | ВН                          | НН | ХХ             | КЗ |                  |                |
| 10000              | 35                          | 11 | 14,5           | 69 | 7,5              | 0,9            |

### 2.3 Збірні шини РУ підстанції

Система збірних шин відкритого розподільного пристрою 110 кВ виконується за схемою з однією секціонованою вимикачем системою шин або двома системами шин із використанням гнучких сталевалюмінієвих дротів марки АС-240/32 або АС-300/39 підвішених за допомогою натяжних гірлянд скляних ізоляторів типу ПС-70Е до зварних металевих порталів.

Крок міжфазних відстаней на порталах та стійках витримується відповідно до умов виключення перекриття повітряних проміжків при грозових перенапругах та розрахункових зусиллях від струмів короткого замикання.

Для розподільного пристрою середньої напруги 35 кВ застосовується жорстка ошиновка з алюмінієвих труб або гнучкий провід АС-120/19 який спирається на опорні ізолятори типу ІОС-35 та забезпечує надійне з'єднання між високовольтними вводами силових трансформаторів, лінійними роз'єднувачами та елегазовими вимикачами.

Ошиновка закритого розподільного пристрою 10 кВ реалізується виключно жорсткими мідними або алюмінієвими шинами прямокутного перерізу марки ШМТ або ШАТ розміром 80х8 або 100х10 міліметрів які прокладаються по опорних полімерних ізоляторах серії ІОК всередині відсіків збірних шин шаф КРУ.

Поділ усієї системи шин підстанції на дві ізольовані секції за допомогою секційних вимикачів із пристроями автоматичного включення резерву АВР дозволяє зберегти в роботі половину споживачів підстанції при пошкодженні однієї з секцій або під час планового виведення обладнання в ремонт.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 28   |

## 2.4 Комутаційне обладнання розподільних пристроїв

На відкритому розподільному пристрої 110 кВ як головний комутаційний апарат лінійних приєднань та введів силових трансформаторів використовується високовольтний вимикач типу ВД-110, який представляє собою сучасний елегазовий або вакуумний апарат колонкового типу із пружинним чи пружинно-гідравлічним приводом.

Цей вимикач має високу вимикальну здатність та забезпечує надійне гасіння електричної дуги в середовищі елегазу SF<sub>6</sub> або у вакуумній камері за мінімальний час спрацювання, що дозволяє швидко локалізувати короткі замикання в магістральній мережі. Для організації видимого розриву та заземлення відключених ділянок РУ-110 застосовуються двоколонкові роз'єднувачі горизонтально-поворотного типу серії РНДЗ-110/1000 з номінальним струмом тисяча ампер, які конструктивно оснащені одним або двома комплектами стаціонарних заземлювальних ножів із механічним блокуванням проти помилкових дій оперативного персоналу.

Таблиця 2.3 – Параметри роз'єднувача типу РНДЗ-110/1000

| Номінальний струм, А | Наскрізний струм КЗ, кА | Струм термічної стійкості, кА, 3 с для полюсів та 1 с для заземлювальних ножів |
|----------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1000                 | 80                      | 31,5                                                                           |

На стороні середньої напруги 35 кВ комутація приєднань здійснюється за допомогою триполюсних вимикачів типу ВМ-35-25/600, які є масляними або модернізованими вакуумними апаратами з номінальним струмом шістьсот ампер та струмом відключення двадцять п'ять кілоампер, що монтуються на відкритих металоконструкціях.

Таблиця 2.4 – Параметри вимикачів типу ВМ-35-25/600

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| Номінальна напруга, кВ          | 35   |
| Найбільша робоча напруга, кВ    | 40,5 |
| Номінальний струм приєднання, А | 600  |
| Номінальний струм вимкнення, кА | 25   |

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 29   |

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| Струм термічної стійкості (5 с), кА   | 10 |
| Струм електродинамічної стійкості, кА | 10 |
| Час вимкнення, не більше, мс          | 40 |

Спільно з ними для виконання комутаційних перемикачів без навантаження та створення безпечних умов праці ремонтних бригад працюють лінійні та шинні роз'єднувачі типу РНДЗ-35/1000 із номінальним струмом тисяча ампер та механічними приводами керування головними й заземлювальними ножами.

У закритому розподільному пристрої 10 кВ як основні комутаційні елементи всередині шаф КРУ застосовуються малогабаритні вакуумні вимикачі типу ВВ-10-20/630 із номінальним струмом шістсот тридцять ампер та граничним струмом відключення двадцять кілоампер. Ці вимикачі встановлені на викатних візках, що дозволяє повністю відмовитися від використання окремих лінійних та шинних роз'єднувачів на стороні 10 кВ, оскільки функція видимого розриву кола реалізується шляхом механічного переміщення самого візка з вимикачем із робочого положення в контрольне або ремонтне.

Таблиця 2.5 – Параметри роз'єднувачів типу РНДЗ-35/1000

| Номінальний струм, А | Наскрізний струм КЗ, кА | Струм термічної стійкості, кА, 3 с для полюсів та 1 с для заземлювальних ножів |
|----------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| 1000                 | 63                      | 25                                                                             |

На РУ-10 кВ підстанції встановлені типові комірочки комплектних розподільчих пристроїв (КРП), що є компактними, надійними та безпечними заводськими блоками. Кожна комірочка містить весь необхідний комплект обладнання для приєднання: вимірювальні трансформатори (струму та напруги), вимикачі, роз'єднувачі та щитове вимірювальне устаткування.

Ключовим елементом цих комірок є вакуумні вимикачі типу ВВ-10/630. Вони забезпечують дугогасіння у глибокому вакуумі, вирізняючись високою надійністю, великим ресурсом, екологічністю, невибагливістю в обслуговуванні, пожежовибу-

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 30   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

хобезпечністю та високою швидкістю дії. Таке рішення гарантує ефективне та безпечне керування численними відхідними лініями 10 кВ, що критично важливо для безперебійного електропостачання кінцевих споживачів (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Параметри вимикачів типу ВВ-10-20/630

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| Номінальна напруга, кВ                | 10  |
| Найбільша робоча напруга, кВ          | 12  |
| Номінальний струм приєднання, А       | 630 |
| Номінальний струм вимкнення, кА       | 20  |
| Струм термічної стійкості (3 с), кА   | 20  |
| Струм електродинамічної стійкості, кА | 52  |
| Час вимкнення, не більше, мс          | 65  |

## 2.5 Захисне обладнання

Захисне обладнання підстанції призначене для безперервного автоматичного контролю стану електричних мереж, миттєвого виявлення аварійних режимів і видачі команд на відключення комутаційних апаратів, а також для захисту ізоляції від небезпечних перенапруг.

Основним елементом захисту ізоляції всього високовольтного устаткування від атмосферних грозових та внутрішніх комутаційних перенапруг є нелінійні обмежувачі перенапруги серій ОПН-110, ОПН-35 та ОПН-10, які монтуються безпосередньо на вводах ліній електропередачі та поблизу нейтралей силових трансформаторів. Ці захисні апарати складаються з високолінійних варисторів на основі оксиду цинку у високоміцних полімерних або порцелянових корпусах, які під дією небезпечної хвилі надмірної напруги миттєво знижують свій внутрішній опір і безпечно скидають імпульс струму на контур заземлення підстанції.

Для виявлення та ліквідації безпосередньо самих коротких замикань на об'єкті впроваджується повний комплекс сучасних мікропроцесорних терміналів релейного захисту та автоматики, які повністю замінюють застарілу електромеханічну елементну базу. Захист силових триобмоткових трансформаторів реалізується на базі багатофункціональних цифрових блоків типу РЗА-ТРАНСФОРМАТОР, які

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 31   |

виконують функції поздовжнього диференційного захисту від внутрішніх пошкоджень, максимального струмового захисту з комбінованим пуском за напругою, а також обробляють сигнали від струменевих та газових реле бака і пристрою РПН. Лінійні приєднання відкритого розподільного пристрою 110 кВ оснащуються терміналами типу РЗА-ЛПНІЯ-110 із вбудованими алгоритмами дистанційного та спрямованого струмового захисту нульової послідовності, автоматичного повторного ввімкнення АПВ та пристроями резервування відмови вимикачів ПРВВ.

Модернізація захисних ланцюгів середньої та нижчої напруги передбачає встановлення мікропроцесорних блоків типу РЗА-ЛПНІЯ-35 для фідерів 35 кВ та малогабаритних терміналів серії РЗА-10 безпосередньо у релейних відсіках викатних комірок КРУ 10 кВ. Дані пристрої забезпечують високу точність налаштування уставки трифазного МСЗ, струмової відсічки та захисту від однофазних замикань на землю з можливістю дії на сигнал або відключення. Особливе місце в системі безпеки закритих розподільних пристроїв посідають сучасні волоконно-оптичні системи захисту від дугових замикань типу ДУГА, які за допомогою мережі оптичних точкових датчиків фіксують спалах світла від електричної дуги всередині шафи КРУ і видають команду на миттєве знеструмлення секції шин за час не більше десяти мілісекунд, запобігаючи руйнуванню суміжного обладнання комірок.

## 2.6 Вимірювальні трансформатори

Встановлені трансформатори струму типу ТВТ-110-100/5 (табл.2.7). Для отримання інформації про величину струму навантаження та струмів короткого замикання на вводах силових трансформаторів застосовуються вбудовані трансформатори струму типу ТВТ-110-100/5 із коефіцієнтом трансформації сто до п'яти.

Таблиця 2.7 – Номінальні характеристики ТВТ-110-100/5

| Первинний струм, А | Вторинний струм, А | Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=0,8$ , ВА | Струм термічної стійкості (3 с), кА | Струм електродинамічної стійкості, кА |
|--------------------|--------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 100                | 5                  | 30                                               | 4                                   | 20                                    |

Такі вимірювальні апарати конструктивно розміщуються безпосередньо всередині прохідних ізоляторів вищої напруги силового трансформатора ТДТН-40000/110, що дозволяє суттєво зекономити корисну площу відкритого розподільного пристрою та відмовитися від монтажу окремих виносних шаф.

Для організації кіл комерційного обліку, вимірювання струму навантаження та живлення мікропроцесорних терміналів релейного захисту на стороні середньої напруги тридцять п'ять кіловольт використовуються вбудовані трансформатори струму типу ТВД-35-300/5 (табл. 2.8).

Дані вимірювальні апарати конструктивно інтегруються безпосередньо у високовольні прохідні ізолятори або вводи масляних чи вакуумних вимикачів серії ВД-35 або ВМ-35, що дозволяє раціонально використовувати робочий простір закритого чи відкритого розподільного пристрою та значно знижує загальну матеріаломісткість ошиновки.

Таблиця 2.8 Номінальні характеристики ТВД-35-300/5

| Первинний струм, А | Вторинний струм, А | Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=0,8$ , ВА | Струм термічної стійкості (3 с), кА | Струм електродинамічної стійкості, кА |
|--------------------|--------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 300                | 5                  | 20                                               | 10                                  | 51                                    |
| 600                | 5                  | 20                                               | 49                                  | 102                                   |

На стороні 35 кВ встановлені трансформатори струму ТОЛ-10 (табл. 2.9). Трансформатор струму ТОЛ-10 — це опорний вимірювальний апарат із литою епоксидною ізоляцією, призначений для передачі сигналу вимірювальної інформації приладам обліку, лабораторним лічильникам та пристроям релейного захисту в закритих розподільних пристроях КРУ на номінальну напругу 10 кВ.

Таблиця 2.9 – Номінальні характеристики ТС ТОЛ-10

| Тип    | Первинний струм, А | Вторинний струм, А | Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=0,8$ , ВА | Струм термічної стійкості (3 с), кА | Струм електродинамічної стійкості, кА |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| ТОЛ-10 | 300                | 5                  | 15                                               | 16                                  | 100                                   |
|        | 600                | 5                  | 15                                               | 20                                  | 100                                   |

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 33   |

На сторони 35 кВ встановлено ТН типу ЗНОМ-35 (табл. 2.10). ЗНОМ-35 — це однофазний заземлювальний масляний апарат, який знижує напругу мережі 35 кВ до стандартних 100 В для живлення релейного захисту, автоматики та приладів обліку.

Таблиця 2.10 – Номінальні характеристики ЗНОМ-35

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| Номінальна напруга первинної обмотки, кВ    | 35  |
| Номінальна напруга вторинної обмотки, В     | 100 |
| Номінальна потужність вторинної обмотки, ВА | 250 |

Зі сторони 10 кВ встановлені НТМИ-10 (табл. 2.11). Це трифазний масляний вимірювальний апарат із п'ятистрижневим магнітопроводом, призначений для масштабного зниження напруги мережі 10 кВ до стандартних 100 В з метою живлення приладів обліку, вольтметрів та мікропроцесорних терміналів релейного захисту.

Таблиця 2.11 – Параметри НТМИ-10

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| Номінальна напруга первинної обмотки, кВ    | 10  |
| Номінальна напруга вторинної обмотки, В     | 100 |
| Номінальна потужність вторинної обмотки, ВА | 200 |

## 2.7 Вимірювальні прилади

Система вимірювальних приладів підстанції 110/35/10 кВ забезпечує безперервний візуальний та автоматизований контроль електричних параметрів режиму роботи обладнання, а також точний комерційний і технічний облік споживаної та виданої енергії.

На щитах керування та безпосередньо на фасадах релейних шаф КРУ 10 кВ, а також панелях ВРУ 35 і 110 кВ встановлені цифрові багатофункціональні щитові прилади, які замінюють застарілі стрілочні амперметри, вольтметри, ватметри та варметри. Ці інтелектуальні датчики підключаються до вторинних обмоток вимірювальних трансформаторів струму та напруги і в реальному часі відображають діючі значення струмів по кожній фазі, лінійні та фазні напруги на секціях шин,

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 34   |

активну і реактивну потужність силових трансформаторів та відхідних ліній, а також частоту мережі.

Для комерційного обліку електричної енергії на вводах силових трансформаторів та на фідерах споживачів впроваджуються високоточні трифазні електронні лічильники класу точності 0,2S або 0,5S типу ЄвроАЛЬФА або аналогічні мікропроцесорні прилади відчизняних виробників, які інтегруються в загальностанційну систему АСКОЕ за допомогою інтерфейсів RS-485 або Ethernet.

Весь масив вимірювальної інформації паралельно передається на верхній рівень диспетчерського керування підстанцією, що дозволяє оперативному персоналу здійснювати дистанційний моніторинг балансу потужності, фіксувати максимуми навантаження, контролювати якість напруги та оперативно реагувати на будь-які відхилення від нормального режиму роботи енергооб'єкта.

## 2.8 Система власних потреб

Система власних потреб підстанції 110/35/10 кВ призначена для надійного та безперервного живлення всіх допоміжних пристроїв, забезпечення нормального функціонування технологічного обладнання, систем захисту, автоматики, зв'язку, а також підтримання належних мікрокліматичних умов у приміщеннях енергооб'єкта.

Основним джерелом живлення цієї системи на стороні нижчої напруги є трифазний масляний двообмотковий понижувальний трансформатор власних потреб типу ТМ-400/10 з номінальною потужністю чотириста кіловольт-ампер. Цей агрегат підключається до збірних шин 10 кВ через окрему комірку КРУ з вакуумним вимикачем і запобіжниками, знижуючи високу напругу до стандартного трифазного рівня нуль сорок кіловольт для безпосереднього живлення щита власних потреб ЩВП.

Від головного низьковольтного щита власних потреб 0,4 кВ через автоматичні вимикачі отримують живлення такі критично важливі споживачі підстанції, як приводи масляних та елегазових вимикачів, електродвигуни обдуву радіаторів головних трансформаторів ТД-10000, системи обігріву шаф зовнішньої установки, зарядні пристрої та акумуляторні батареї системи оперативного постійного струму

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 35   |

СОПС, а також внутрішнє й охоронне освітлення та вентиляція. Для забезпечення максимальної живучості та надійності роботи підстанції в аварійних ситуаціях зазвичай встановлюють два незалежні трансформатори власних потреб ТМ-400/10, які підключаються до різних секцій шин 10 кВ і працюють паралельно або з використанням схеми автоматичного включення резерву АВР на шинах низької напруги.

## 2.9 Розрахунок струмів КЗ

На рис. 2.1 зображено заступну схему для подальшого розрахунку.

Прийmemo

$$S_6 = 1200 \text{ МВА};$$

$$U_{61} = 115 \text{ кВ}; \quad U_{62} = 37 \text{ кВ}; \quad U_{63} = 10,5 \text{ кВ}; \quad U_{64} = 6,3 \text{ кВ}.$$

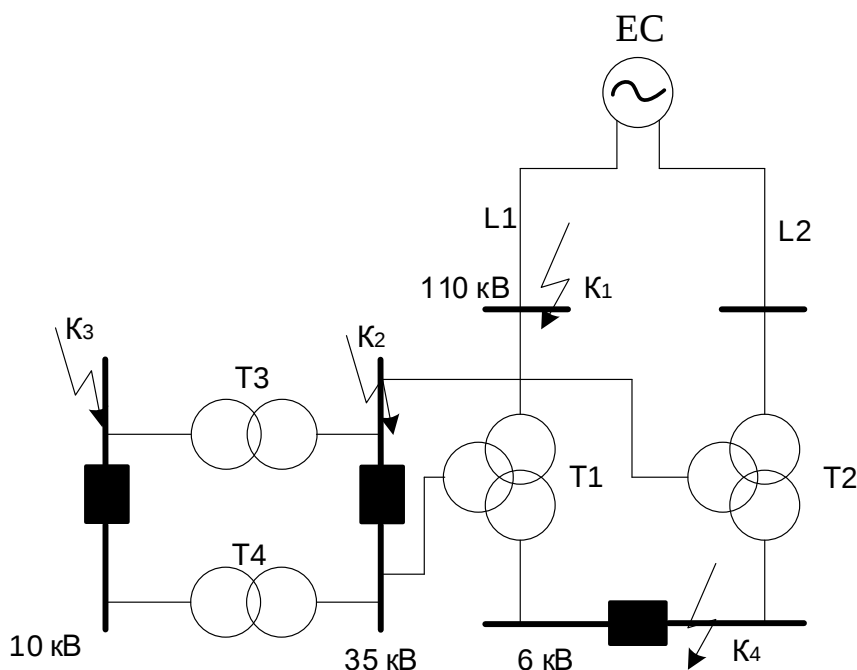


Рисунок 2.1 – Схема ПС

Струми, прийняті зв базисні:

$$I_{61} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{61}} = \frac{1200}{\sqrt{3} \cdot 115} = 6.025 \text{ кА};$$

$$I_{62} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{62}} = \frac{1200}{\sqrt{3} \cdot 37} = 18.725 \text{ кА};$$

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 36   |

$$I_{63} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{63}} = \frac{1200}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 65.983 \text{ кА};$$

$$I_{64} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{64}} = \frac{1200}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 109.971 \text{ кА}.$$

Опір ЕЕС прийнято:

$$X_c = 1.2 \text{ в.о.}$$

Опір ліній:

$$X_{Л1} = X_{Л2} = l \cdot x_0 \cdot \frac{S_6}{U_{CP}^2} = 10 \cdot 0,4 \cdot \frac{1200}{115^2} = 0.363 \text{ в.о.}$$

Дві лінії 110 кВ та довжиною 8 км, індуктивний опір прийнято 0,4 Ом/км.

Визначаємо напруги КЗ трансформатора:

$$u_{KB} = 0,5 \cdot (u_{K(B-C)} + u_{K(B-H)} - u_{K(C-H)}) = 0,5 \cdot (10,5 + 17,7 - 6,2) = 10,85\%;$$

$$u_{KC} = 0,5 \cdot (u_{K(B-C)} + u_{K(C-H)} - u_{K(B-H)}) = 0,5 \cdot (10,5 + 6,2 - 17,4) = -0,35\% = 0;$$

$$u_{KH} = 0,5 \cdot (u_{K(B-H)} + u_{K(C-H)} - u_{K(B-C)}) = 0,5 \cdot (17,4 + 6,2 - 10,5) = 6,55\%.$$

Визначаємо опори обмоток:

$$X_{TB1} = X_{TB2} = \frac{u_{KB}}{100} \frac{S_6}{S_{ном}} = \frac{10,85}{100} \frac{1200}{31,5} = 4.133 \text{ в.о.};$$

$$X_{TC1} = X_{TC2} = 0;$$

$$X_{TH1} = X_{TH2} = \frac{u_{KH}}{100} \frac{S_6}{S_{ном}} = \frac{6,55}{100} \frac{1200}{31,5} = 2.495 \text{ в.о.}$$

Визначаємо опір обмоток ТД-10000/35:

$$X_{T3} = X_{T4} = \frac{u_K}{100} \frac{S_6}{S_{ном}} = \frac{7,5}{100} \frac{1200}{10} = 9 \text{ в.о.}$$

Схема заміщення зображена на рис. 2.2.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 37   |

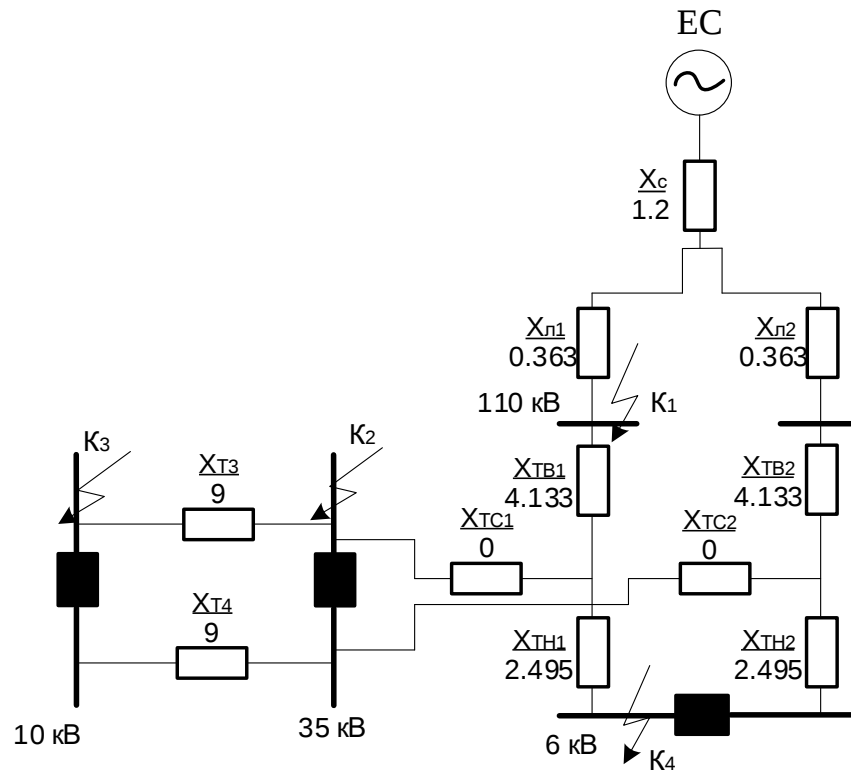


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема заміщення

Розглядаємо роботу в нормальному режимі роботи де відключені секційні вимикачі напругою 35 та 10 кВ.

$$X_{E\_K1} = X_c + X_{L1} = 1.2 + 0.363 = 1.563 \text{ в.о.}$$

$$X_{E\_K2} = X_c + X_{L1} + X_{TB1} = 1.2 + 0.363 + 4.133 = 5.696 \text{ в.о.}$$

$$X_{E\_K3} = X_c + X_{L1} + X_{TB1} + X_{T3} = 1.2 + 0.363 + 4.133 + 9 = 14.696 \text{ в.о.}$$

$$X_{E\_K4} = X_c + X_{L1} + X_{TB1} + X_{TH1} = 1.2 + 0.363 + 4.133 + 2.495 = 8.192 \text{ в.о.}$$

Визначимо періодичні складові  $I_{K3}$ :

$$I_{I0\_K1} = \frac{E_c''}{X_{E\_K1}} \cdot I_{61} = \frac{1.2}{1.563} \cdot 6.025 = 4.626 \text{ кА};$$

$$I_{I0\_K2} = \frac{E_c''}{X_{E\_K2}} \cdot I_{62} = \frac{1.2}{5.696} \cdot 18.725 = 3.945 \text{ кА};$$

$$I_{I0\_K3} = \frac{E_c''}{X_{E\_K3}} \cdot I_{63} = \frac{1.2}{14.696} \cdot 65.983 = 5.388 \text{ кА};$$

$$I_{I0\_K4} = \frac{E_c''}{X_{E\_K4}} \cdot I_{64} = \frac{1}{8.192} \cdot 109.971 = 16.11 \text{ кА.}$$

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 38   |

Визначимо ударні струми:

$$i_{y\partial\_K1} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{I0\_K1} = \sqrt{2} \cdot 1,61 \cdot 4.626 = 10.532 \text{ кА};$$

$$i_{y\partial\_K2} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{I0\_K2} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 3.945 = 10.153 \text{ кА};$$

$$i_{y\partial\_K3} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{I0\_K3} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 5.388 = 13.867 \text{ кА};$$

$$i_{y\partial\_K4} = \sqrt{2} \cdot K_y \cdot I_{I0\_K4} = \sqrt{2} \cdot 1,82 \cdot 16.11 = 41.465 \text{ кА}.$$

Визначимо загальні струми:

$$I_{I\_K1} = I_{I0\_K1} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 4.626 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2} = 6.109 \text{ кА};$$

$$I_{I\_K2} = I_{I0\_K2} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 3.945 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,82 - 1)^2} = 6.04 \text{ кА};$$

$$I_{I\_K3} = I_{I0\_K3} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 5.388 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,82 - 1)^2} = 8.25 \text{ кА};$$

$$I_{I\_K4} = I_{I0\_K4} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (K_y - 1)^2} = 16.11 \sqrt{1 + 2 \cdot (1,82 - 1)^2} = 24.669 \text{ кА}.$$

Зведемо отримані дані в табл. 2.12.

Таблиця 2.12 – Отримані величини струмів КЗ

| Місце КЗ       | $I_{n0}$ , кА | $i_{y\partial}$ , кА | $I_I$ , кА |
|----------------|---------------|----------------------|------------|
| К <sub>1</sub> | 4.626         | 10.532               | 6.109      |
| К <sub>2</sub> | 3.945         | 10.153               | 6.04       |
| К <sub>3</sub> | 5.388         | 13.867               | 8.25       |
| К <sub>4</sub> | 16.11         | 41.465               | 24.669     |

## Висновки по розділу 2

Виконано загальний опис обладнання. На підстанції встановлено два трифазні триобмоткові силові трансформатори типу ТДТН-40000/110, номінальна потужність кожного трансформатора становить 40 МВА. В якості додаткових трансформаторів встановлені ТД-10000/35.

Система збірних шин відкритого розподільного пристрою 110 кВ виконується за схемою з однією секціонованою вимикачем системою шин.

На відкритому розподільному пристрої 110 кВ як головний комутаційний апарат лінійних приєднань та введів силових трансформаторів використовується високовольтний вимикач типу ВД-110.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 39   |

Для організації видимого розриву та заземлення відключених ділянок РУ-110 застосовуються двоколонкові роз'єднувачі горизонтально-поворотного типу серії РНДЗ-110/1000.

На стороні середньої напруги 35 кВ комутація приєднань здійснюється за допомогою триполюсних вимикачів типу ВМ-35-25/600.

Спільно з ними для виконання комутаційних перемикань без навантаження та створення безпечних умов праці ремонтних бригад працюють лінійні та шинні роз'єднувачі типу РНДЗ-35/1000.

У закритому розподільному пристрої 10 кВ як основні комутаційні елементи всередині шаф КРУ застосовуються малогабаритні вакуумні вимикачі типу ВВ-10-20/630.

На РУ-10 кВ підстанції встановлені типові комірки комплектних розподільчих пристроїв (КРП). Ключовим елементом цих комірок є вакуумні вимикачі типу ВВ-10/630.

Основним елементом захисту ізоляції всього високовольтного устаткування від атмосферних грозових та внутрішніх комутаційних перенапруг є нелінійні обмежувачі перенапруги серій ОПН-110, ОПН-35 та ОПН-10.

Для виявлення та ліквідації безпосередньо самих коротких замикань на об'єкті впроваджується повний комплекс сучасних мікропроцесорних терміналів релейного захисту та автоматики, які повністю замінюють застарілу електромеханічну елементну базу.

Встановлені трансформатори струму типу ТВТ-110-100/5 та трансформатори струму типу ТВД-35-300/5.

Дані вимірювальні апарати конструктивно інтегруються безпосередньо у високовольтні прохідні ізолятори або вводи масляних чи вакуумних вимикачів серії ВД-35 або ВМ-35.

Виконано розрахунки струмів КЗ на шинах ПС, отримані результати зведено в таблицю.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.ЕК2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 40   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

## З РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З РЕКОНСТРУКЦІЇ РЗА ТА ВИБІР МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ОБЛАДНАННЯ

### 3.1. Обґрунтування структури та функціонального складу оновленого комплексу РЗА

Реконструкція РЗА об'єкта класу 110 кВ вимагає кардинальної зміни підходу до побудови вторинних кіл. Головним інженерним рішенням є повне апаратне та функціональне розділення захистів. На відміну від старих панелей, де основні та резервні функції часто використовували спільні кола відключення, новий комплекс будується за принципом повної незалежності.

Принцип апаратної надликовості (дублювання): для триобмоткових трансформаторів підстанцій 110 кВ функції основного захисту (диференційного) та резервних захистів (дистанційного, МСЗ) розносяться в окремі фізичні мікропроцесорні пристрої. Вони монтуються в окремих шафах, отримують живлення від різних автоматичних вимикачів у шафі розподілу постійного струму (ШРПС) та підключаються до різних обмоток трансформаторів струму (наприклад, основний захист — до керна 10П №1, резервний — до керна 10П №2). Це гарантує, що при відмові одного з терміналів підстанція залишається під надійним захистом.

В якості основного захисту вибрано мікропроцесорний комплекс на базі АВВ RET670, крім суто захисних функцій, він бере на себе завдання осцилографування аварійних процесів (РАП), фіксації діючих значень струмів (вимірювання) та технічного обліку ресурсу вимикачів (контроль кількості спрацювань та інтеграла струму). Це дозволяє демонтувати з підстанції застарілі автономні реєстратори.

Для об'єктів високого класу напруги чинні нормативні вимоги Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) регламентують обов'язкове розділення функцій релейного захисту на основні та резервні комплекси. У проекті реконструкції цей принцип реалізується через такі технічні рішення:

|           |      |                 |        |      |                                                                                                |                                                |      |         |
|-----------|------|-----------------|--------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------|---------|
|           |      |                 |        |      | 141.ЕК2106.006.ДБ                                                                              |                                                |      |         |
| Змн.      | Арк. | № докум.        | Підпис | Дата | РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З<br>РЕКОНСТРУКЦІЇ РЗА ТА ВИБІР<br>МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ОБЛАД-<br>НАННЯ | Літ.                                           | Арк. | Аркушів |
| Розроб.   |      | Видойний Б.С.   |        |      |                                                                                                |                                                |      |         |
| Перевір.  |      | Нестерко А.Б.   |        |      |                                                                                                |                                                | 41   | 16      |
| Н. Контр. |      | Ягельский Є.О.  |        |      |                                                                                                | КПІ ім. Ігоря<br>Сікорського<br>ФЕА, гр. ЕК-21 |      |         |
| Затв.     |      | Дерев'янко Д.Г. |        |      |                                                                                                |                                                |      |         |

- функції основного захисту триобмоткових силових трансформаторів (повздовжній диференційний захист) та комплекс резервних захистів (дистанційний захист, МСЗ з пуском за напругою) реалізуються в окремих фізичних мікропроцесорних терміналах, які розміщуються у самостійних шафах РЗА;

- шафа основного захисту та шафа резервних захистів отримують живлення від різних автоматичних вимикачів у шафі розподілу постійного струму (ШРПС), що підключена до загальнопідстанційної акумуляторної батареї. Це виключає ризик повної відмови РЗА при короткому замиканні у внутрішніх колах живлення одного з терміналів;

- вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів струму (ТС) мають кілька окремих сердечників (кernів) класу точності 10П. Кабелі від керна №1 прокладаються виключно до термінала основного захисту ABB RET670, а від керна №2 — до термінала резервних захистів. Аналогічно розділяються і вторинні кола трансформаторів напруги (ТН).



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд мікропроцесорного пристрою типу RET670

Структура оновленого комплексу автоматизації підстанції чітко розмежовується за трьома технологічними рівнями:

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 42   |

### 1. Рівень розподільного пристрою 110 кВ (РУ-110 кВ)

Захист живильних ліній 110 кВ: реалізується на базі поєднання дистанційного захисту від міжфазних КЗ (ANSI 21) та струмового направленого захисту нульової послідовності (ТНЗНП, ANSI 67N) від замикань на землю в мережі з глухо-заземленою нейтраллю.

Захист шин (ДЗШ-110 кВ): впроваджується швидкодійний диференційний захист шин для миттєвої ліквідації аварій на системах шин 110 кВ.

Автоматика ліній: інтегрується одно- або трифазне автоматичне повторне ввімкнення (АПВ, ANSI 79) та пристрій резервування відмови вимикача (УРОВ, ANSI 50BF).

### 2. Рівень силових трансформаторів 110/35/10 кВ

Основний захист: мікропроцесорний термінал ABB RET670 (диференційний захист трансформатора ANSI 87T та обмежений захист від заземлень REF ANSI 87N).

Резервний захист: окремий мікропроцесорний термінал, що містить дистанційні органи та ступені МСЗ для сторін ВН, СН та НН.

Технологічний захист: збір та цифровий аналіз неелектричних параметрів (сигнали від газового реле бака, струминного реле РПН, датчиків рівня та температури масла).

### 3. Рівень розподільних пристроїв 35 кВ та 10 кВ (ЗРП-35 кВ, КРУ-10 кВ)

Захист відхідних фідерів: малогабаритні цифрові інтелектуальні пристрої (ІЕП) серії АВВ, які монтуються безпосередньо у релейних відсіках комірок.

Автоматика секціонування: швидкодійне автоматичне введення резерву (АВР) на секційних вимикачах СВ-35 та СВ-10 кВ.

Протиаварійна автоматика: інтеграція пристроїв автоматичного частотного розвантаження (АЧР) для відключення невідповідальних споживачів при дефіциті активної потужності в енергосистемі.

Замість класичних індивідуальних кабельних зв'язків між реле, структура оновленого комплексу передбачає побудову локальної обчислювальної мережі (ЛОМ) підстанції за міжнародним стандартом IEC 61850.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 43   |

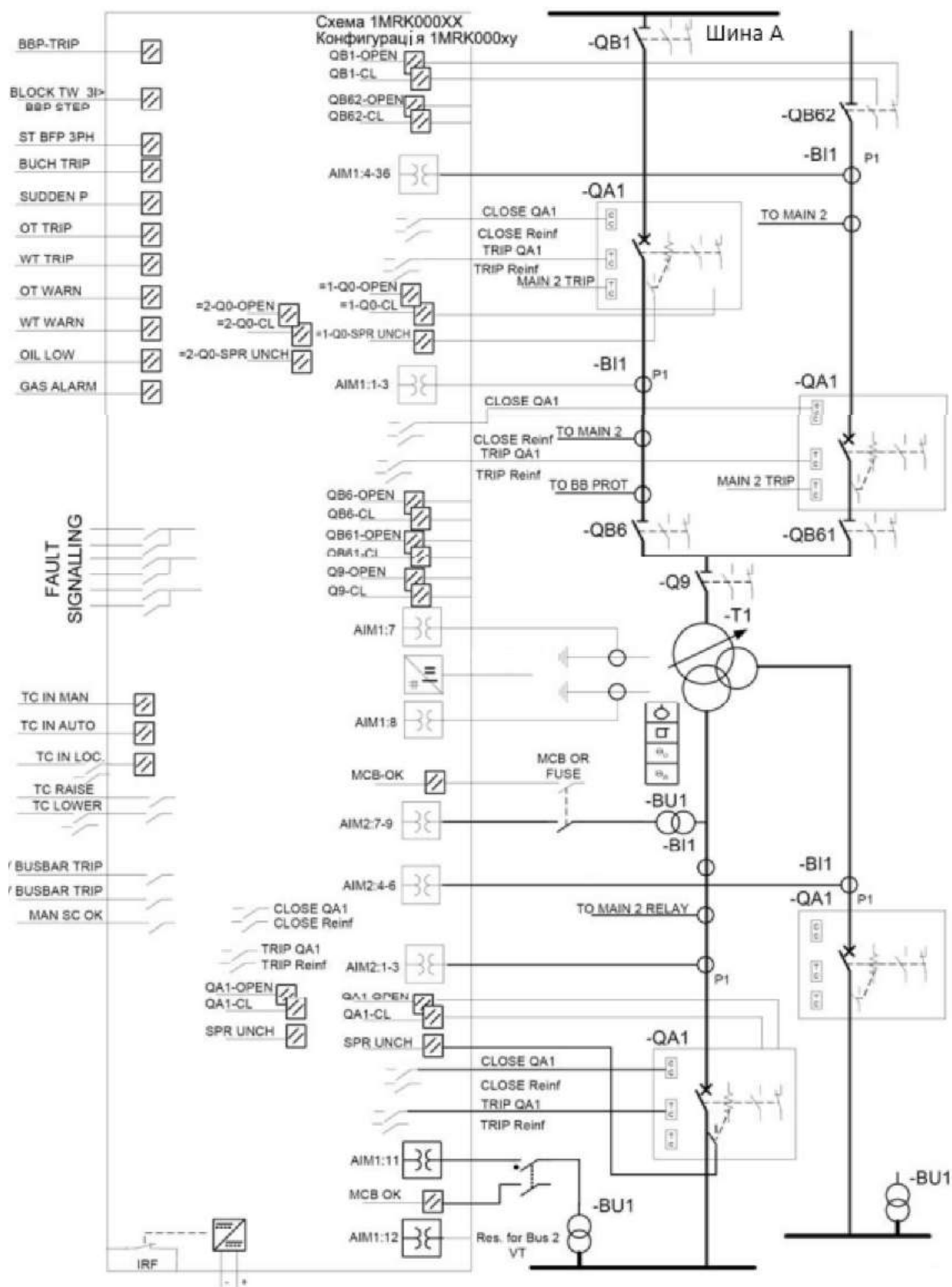


Рисунок 3.2 - Типова схема з'єднань RET670 для триобмотувального трансформатора

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 44   |

Вся інформація всередині комплексу РЗА циркулює двома незалежними цифровими потоками:

- шина станції (Station Bus — IEC 61850-8-1): об'єднує всі термінали РЗА через волоконно-оптичні кабелі та промислові комутатори Ethernet із сервером загальнопідстанційного рівня. По цьому каналу передаються телесигнали, телевимірювання та осцилограми аварійних подій у диспетчерський пункт (SCADA-систему);

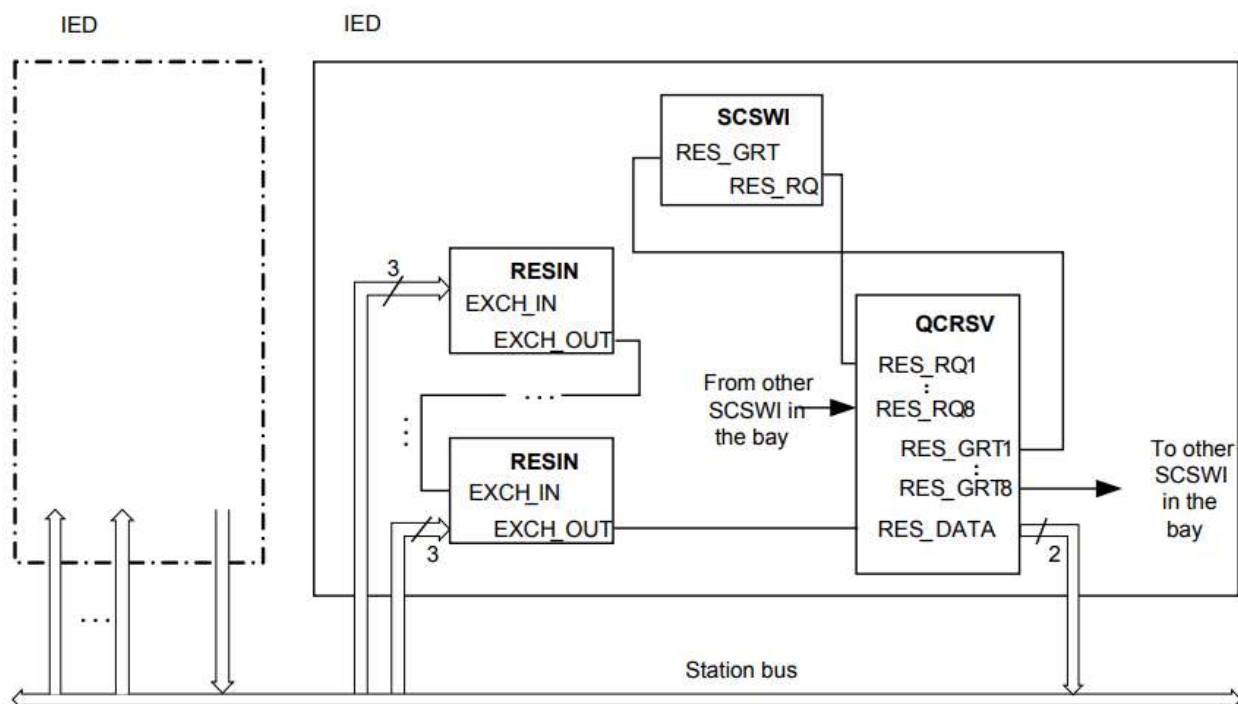


Рисунок 3.3 - Принципи застосування резервування в шині станції

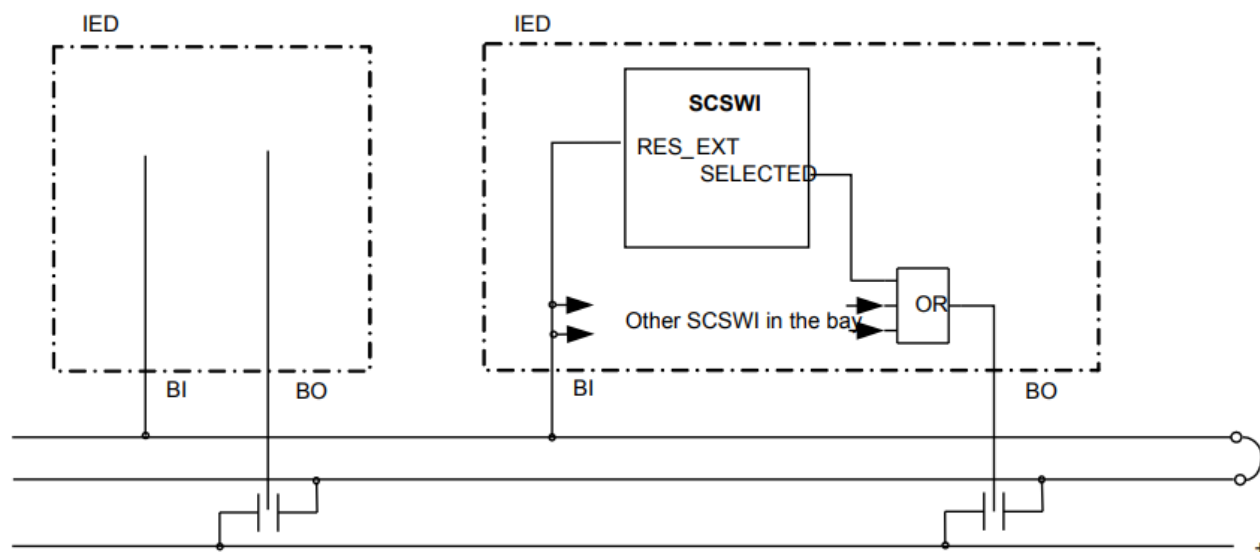


Рисунок 3.4 - Принципи реалізації резервування за допомогою зовнішніх зв'язків

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 45   |

- горизонтальні зв'язки (GOOSE-повідомлення): високошвидкісний обмін логічними командами між терміналами різних приєднань (наприклад, передача сигналу блокування ЛЗШ або робота УРОВ). Швидкість передачі пакетів GOOSE становить менш як 3 мс, що перевищує швидкість замикання фізичних контактів проміжних реле.

Така структура комплексу РЗА суттєво скорочує витрати на кабельно-провідникову продукцію, мінімізує похибки вимірювань завдяки цифровій фільтрації сигналів та забезпечує повний безперервний самоконтроль (самодіагностику) кожного елемента системи релейного захисту.

### **3.2 Модернізація захисту триобмоткових силових трансформаторів на базі ABB RET670**

Силові триобмоткові трансформатори класу напруги 110 кВ є найбільш відповідальними елементами підстанції, оскільки вони забезпечують зв'язок між трьома класами напруги та здійснюють транзит потужності.

Проектування захисту таких трансформаторів потребує врахування низки фізичних та технологічних факторів: кутового зсуву векторів струму між обмотками, різниці номінальних струмів на різних сторонах, кидків струму намагнічування та насичення трансформаторів струму при наскрізних КЗ.

Для вирішення цих інженерних задач у проекті реконструкції застосовується інтелектуальний електронний пристрій (ІЕП) ABB RET670 (серія Relion®), який реалізує повний комплекс основних електричних захистів та виконує роль центрального концентратора технологічної автоматики трансформатора.

Диференційний захист є основним швидкодієвим захистом трансформатора від усіх видів багатозначних КЗ в обмотках та на їхніх виводах, а також від виткових замикань.

Алгоритм обчислення робочого та гальмівного струмів: математичний апарат термінала RET670 безперервно обчислює диференційні (робочі) струми ( $I_{\text{диф}}$ ) та струми гальмування ( $I_{\text{гальм}}$ ) для кожної з трьох фаз індивідуально за алгоритмом:

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 46   |

$$I_{\text{Гальм}} = \frac{|\dot{I}_{\text{ВН}}| + |\dot{I}_{\text{СН}}| + |\dot{I}_{\text{НН}}|}{2}$$

У нормальному режимі та при зовнішніх КЗ сума векторів струмів з урахуванням напрямків дорівнює нулю (або струму небалансу  $I_{\text{нб}}$ ). При КЗ в зоні захисту баланс порушується, робочий струм стрімко зростає, що призводить до миттєвого спрацювання.

Цифрова компенсація кута зсуву фаз (векторний поворот): триобмотковий трансформатор має схему та групу з'єднання обмоток  $Y/Y_0/\Delta-11$ . Обмотка НН (10 кВ), з'єднана в трикутник, викликає зсув векторів струму цієї сторони на  $30^\circ$  відносно обмоток ВН та СН.

У застарілих електромеханічних захистах для відбудови від цього зсуву доводилося фізично з'єднувати ТС сторони ВН у трикутник, що ускладнювало монтаж та перевірку кіл. В ABB RET670 вторинні обмотки ТС усіх трьох сторін підключаються за найпростішою схемою — в «повну зірку». Кутовий зсув та цифрове вирівнювання амплітуд струмів (через відмінність коефіцієнтів трансформації) здійснюються програмно всередині процесора шляхом матричного перемноження векторів:

$$\begin{bmatrix} I'_A \\ I'_B \\ I'_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$$

Адаптивне гальмування від наскрізних КЗ: при протіканні великих струмів наскрізних КЗ (поза зоною захисту трансформатора) трансформатори струму однієї зі сторін можуть увійти в режим глибокого магнітного насичення. Це призводить до спотворення вторинного струму та появи хибного струму небалансу, який диференційне реле може сприйняти як внутрішню аварію. Для запобігання хибним діям у RET670 реалізовано двоступеневу похилу характеристику гальмування в комплексній площині.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 47   |

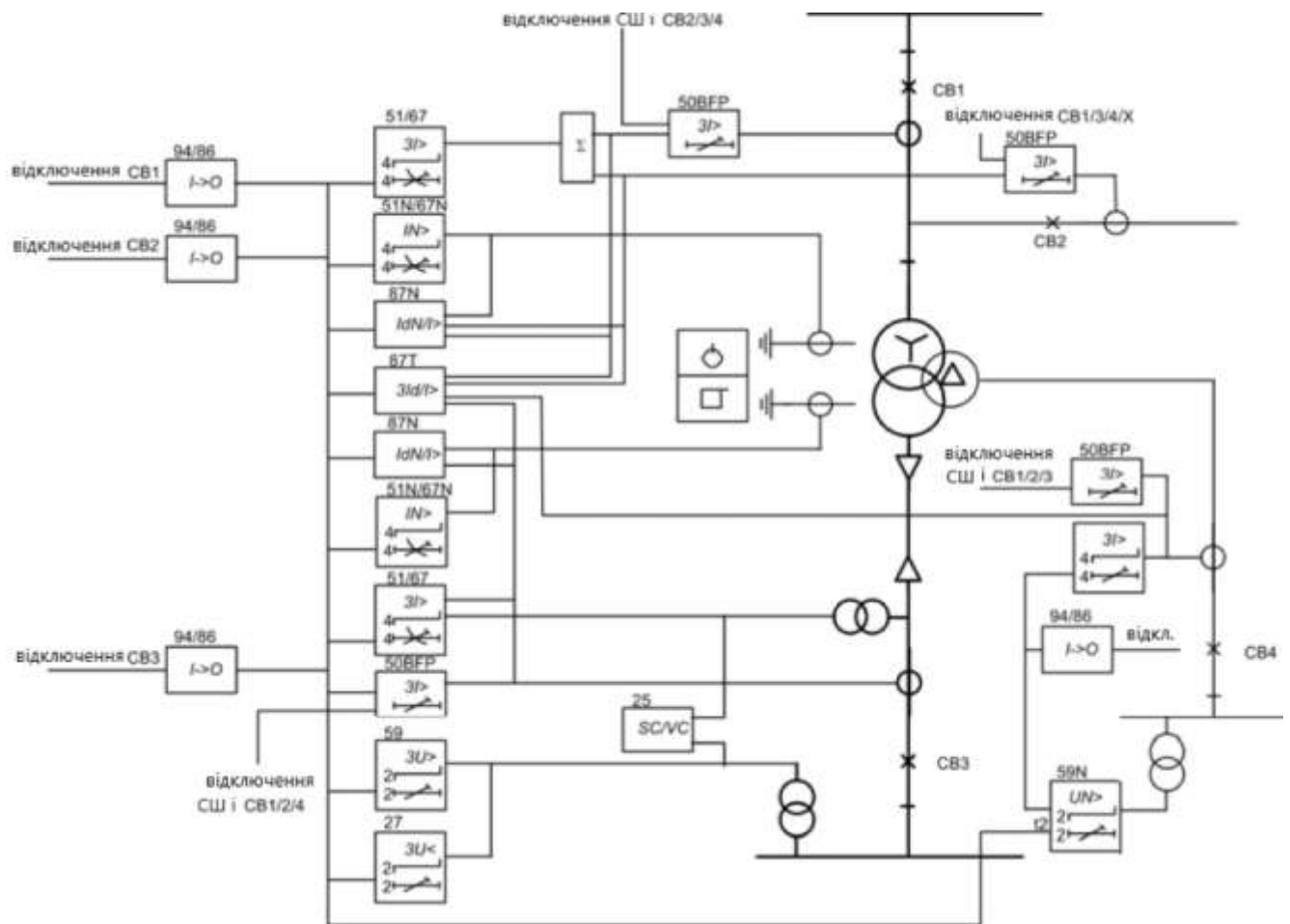


Рисунок 3.5 - Типова конфігурація захисту триобмотувального трансформатора

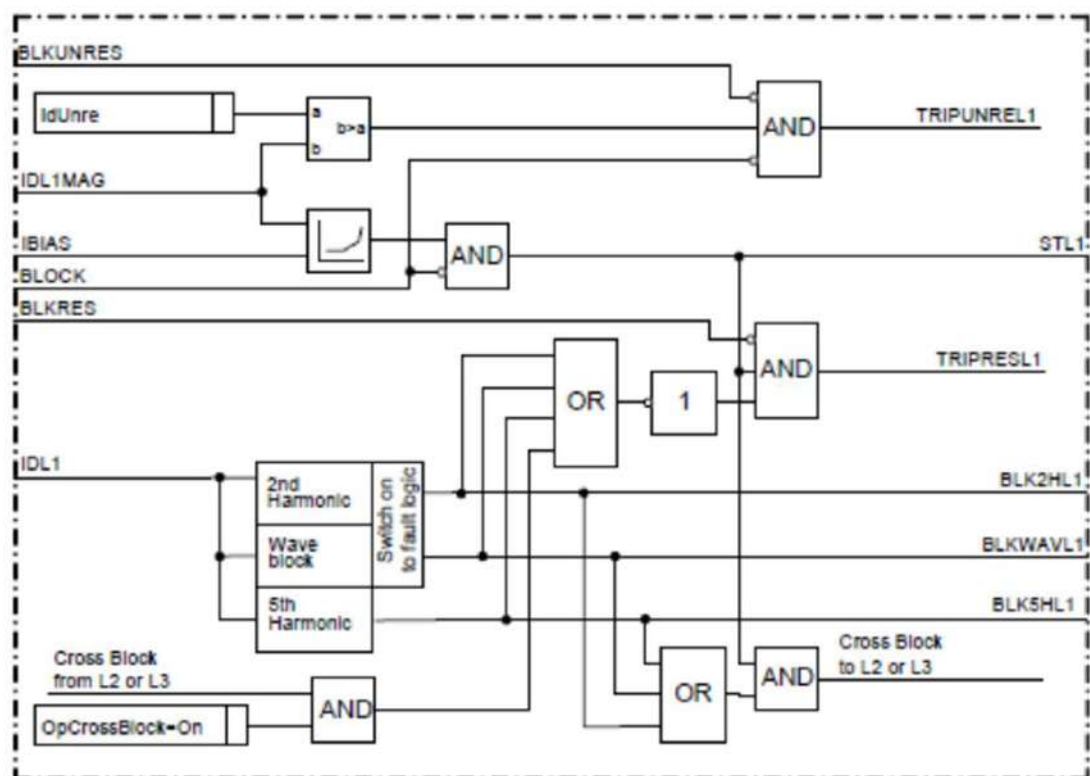


Рисунок 3.6 - Логічна схема диф.захисту

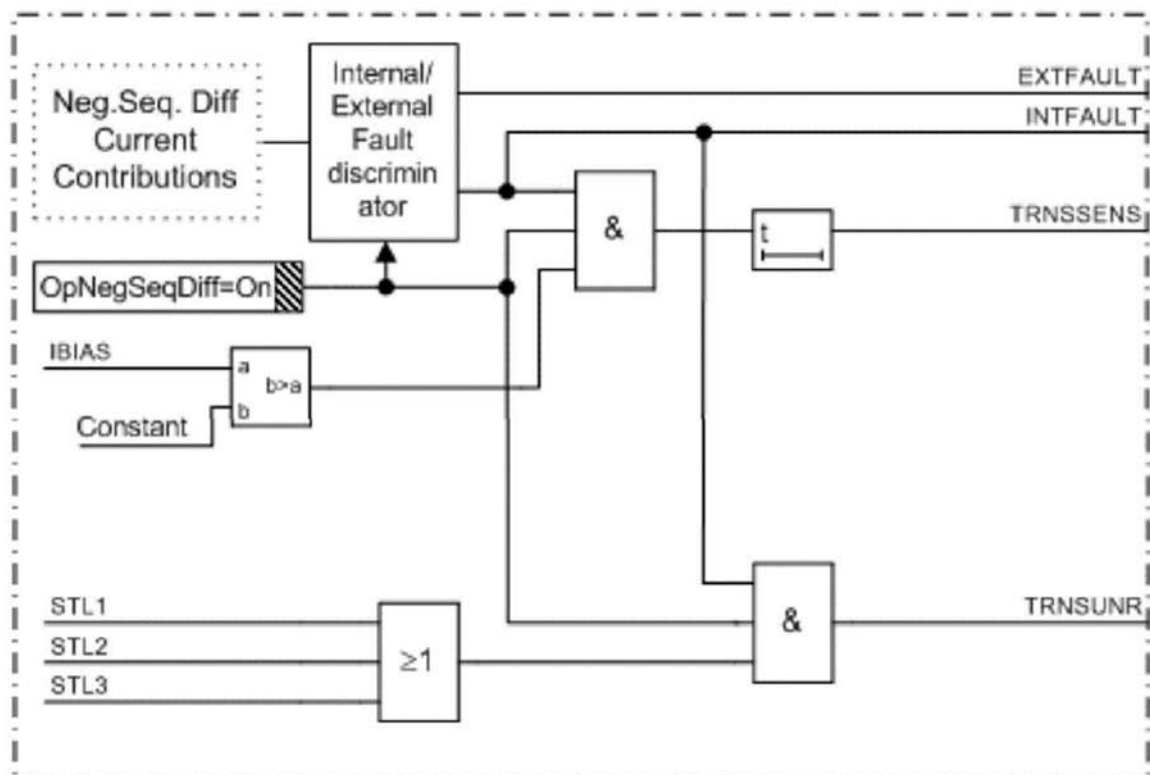


Рисунок 3.7 – Логічна схема диф. захисту селектора несправностей

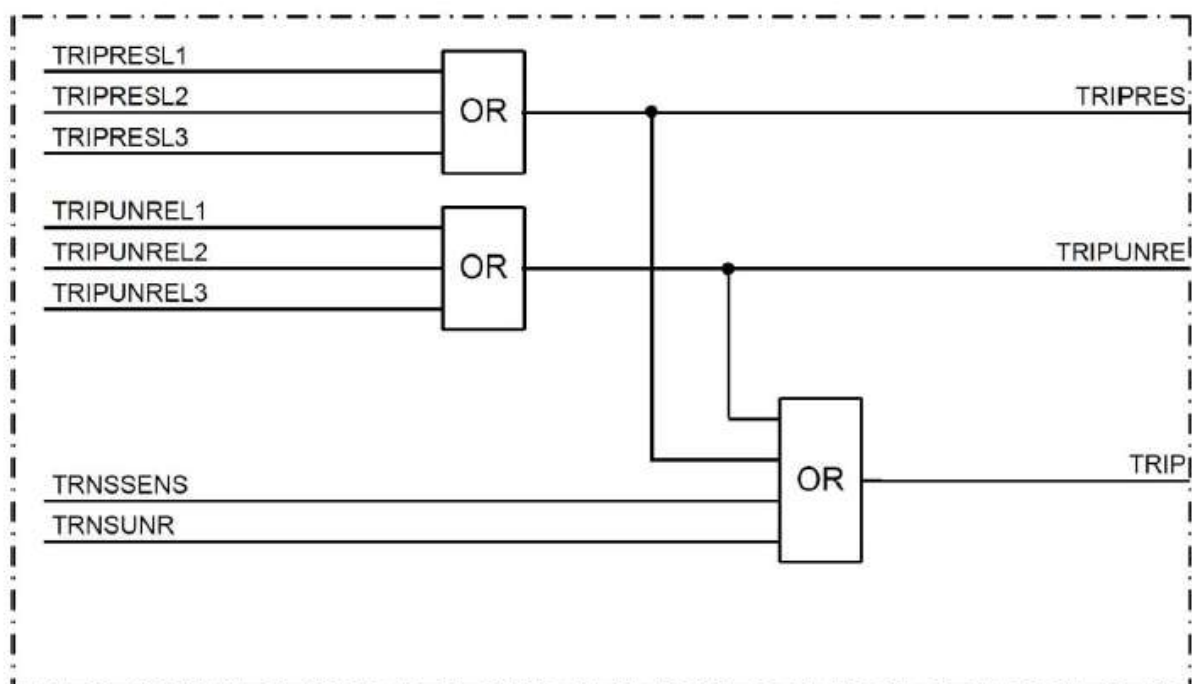


Рисунок 3.8 – Відключення диференційного захисту трансформатора групою сигналів

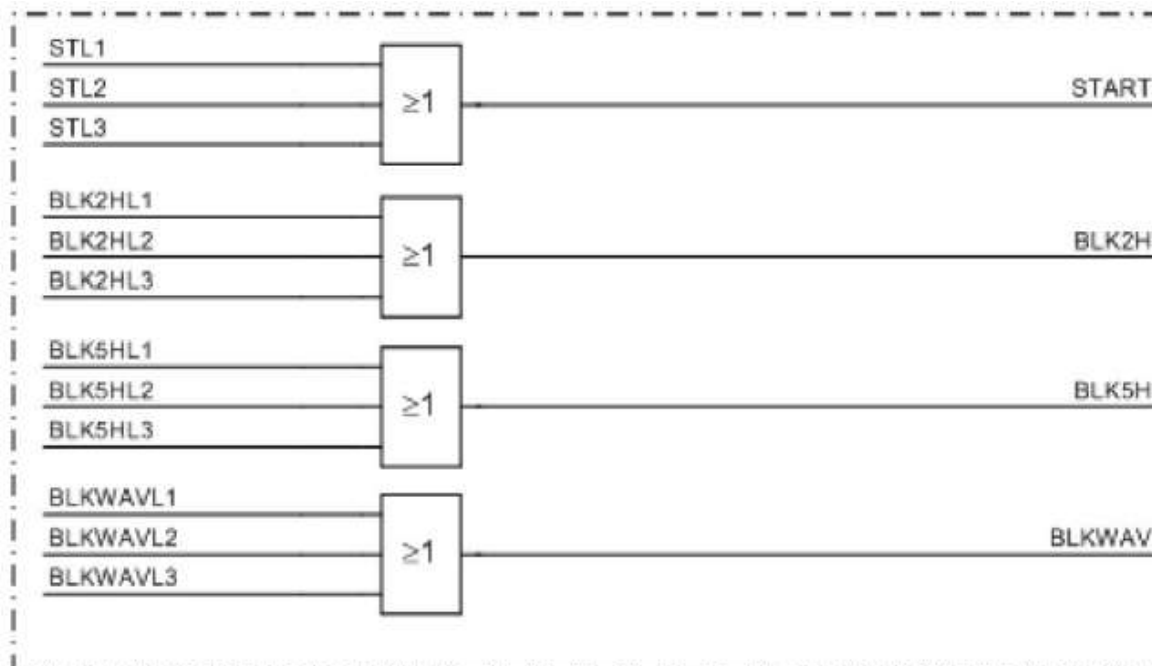


Рисунок 3.9 – Група сигналів диф.захисту трансформатора

Блокування за вищими гармоніками (відбудова від ікруш-струмів): при ввімкненні трансформатора під напругу на холостий хід або при відновленні напруги після ліквідації зовнішнього КЗ виникає перехідний кидок струму намагнічування (ікруш-струм), який може перевищувати номінальний струм у 6...8 разів. Оскільки цей струм протікає лише з боку живильної обмотки, диференційний захист бачить його як внутрішнє КЗ.

Алгоритм ABB RET670 виконує швидке перетворення Фур'є для виділення спектрального складу сигналу. Оскільки кидок струму намагнічування характеризується високим вмістом другої гармоніки (100 Гц), а режим перезбудження магнітопроводу — п'ятої гармоніки (250 Гц), при перевищенні ними встановленого відсотка від основної гармоніки (50 Гц) захист автоматично блокується на час згасання перехідного процесу.

Оскільки обмотка високої напруги 110 кВ триобмоткового трансформатора працює в мережі з ефективно заземленою нейтраллю, виникає потреба у високочутливому захисті від однофазних КЗ на землю, особливо при пошкодженнях витків поблизу нейтральної точки обмотки. Звичайний диференційний захист (87Т) у таких випадках може мати недостатню чутливість через малий приріст фазних струмів.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 50   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

Функція REF здійснює пофазне порівняння векторної суми трьох струмів фаз сторони ВН із реальним струмом, що вимірюється трансформатором струму, встановленим у заземленому нейтральному провіднику силового трансформатора.

При виникненні замикання на землю всередині обмотки баланс порушується, з'являється диференційний струм нульової послідовності, і функція REF миттєво відключає трансформатор з усіх сторін без очікування витримок часу резервних захистів.

Крім основних захистів, архітектура RET670 дозволяє активувати повний комплекс резервних захистів, призначених для дальнього резервування суміжних елементів мережі та ближнього резервування на випадок відмови основних комплексів.

Дистанційний захист (ANSI 21): активується на стороні ВН (110 кВ) та СН (35 кВ) як основний резервний ступінь від міжфазних КЗ. Захист працює шляхом безперервного обчислення повного опору петлі КЗ ( $Z = U/I$ ) та порівняння його з квадрилатеральною (чотирикутною) характеристикою спрацювання в комплексній площині R-X. Це забезпечує чітку селективність незалежно від режимів роботи системи та величини перехідного опору дуги в точці пошкодження.

Направлений максимальний струмовий захист нульової послідовності (ТНЗНП, ANSI 67N): триступеневий захист сторони 110 кВ від замикань на землю. Для визначення напрямку КЗ (в трансформатор чи в лінію) пристрій використовує орган напрямку потужності нульової послідовності.

Максимальний струмовий захист (МСЗ, ANSI 51): реалізується на всіх трьох сторонах трансформатора. Для підвищення чутливості МСЗ сторін 35 та 10 кВ виконується з комбінованим пуском за напругою (від реле мінімальної міжфазної напруги та реле напруги зворотної послідовності). Це дозволяє відбудувати струм спрацювання від номінального струму трансформатора без ризику завантаження захисту при післяаварійних самозапусках двигунів споживачів.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 51   |

### 3.3 Інтеграція технологічних захистів трансформатора

Технологічні (неелектричні) захисти призначені для ліквідації аварійних режимів, викликаних внутрішніми пошкодженнями силового трансформатора, що супроводжуються виділенням газу, кипінням або витіканням ізоляційного масла, а також підвищенням тиску чи температури всередині бака.

Оскільки ці процеси є прямим наслідком руйнування ізоляції обмоток, дугових розрядів або відмови системи охолодження, швидкість та надійність їхньої фіксації є критично важливими.

У застарілих схемах автоматики сигнали від первинних датчиків збиралися на панелях із використанням електромеханічних проміжних реле (наприклад, серії РП-23), які розміщувалися у проміжних шафах затискачів біля трансформатора. Це призводило до окиснення контактів, хибних спрацювань через вологу та вимагало прокладання великої кількості мідних кабелів.

При реконструкції РЗА всі первинні замикаючі контакти технологічних датчиків підключаються безпосередньо до модулів дискретних входів (Binary Inputs) термінала ABB RET670. Внутрішня логіка пристрою виконує програмну фільтрацію від брязкоту контактів (дебаунсинг) та селективно розподіляє команди на сигналізацію або миттєве відключення.

Головним неелектричним захистом є газовий захист, який реалізується на базі двочашкового газового реле (типу BF-80/Q), врізаного в з'єднувальний трубопровід між основним баком трансформатора та масляним розширювачем.

Внутрішня логіка термінала RET670 обробляє сигнали від двох незалежних ступенів газового реле:

- перший ступінь (сигнальний): замикається при повільному газоутворенні (що свідчить про початкову стадію розкладання ізоляції через місцеве нагрівання чи «пожежу сталі» магнітопроводу) або при поступовому зниженні рівня масла через витікання. Дискретний сигнал надходить у RET670, де активує світлодіод індикації на передній панелі, фіксується в журналі подій і передається по станційній шині на пункт диспетчера;

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 52   |

- другий ступінь (відключаючий): спрацьовує при виникненні потужної електричної дуги всередині бака (внутрішнє КЗ). Це викликає бурхливе виділення газу та стрімкий потік масла в бік розширювача. При досягненні швидкості руху масляного потоку в межах 0,6...1,0 м/с контакти струминного органу замикаються. Термінал RET670 обробляє цей дискретний сигнал за найвищим пріоритетом і миттєво (без витримок часу) видає команди на відключення вимикачів усіх трьох сторін трансформатора з одночасним пуском алгоритму УРОВ.

Силовий трансформатор ТМН-1600/35 обладнаний пристроєм регулювання напруги під навантаженням (РПН). Комутація відгалужень обмоток супроводжується природним дуговим розривом у маслі, що викликає постійне виділення газів. Через це бак перемикача РПН повністю ізольований від основного бака трансформатора.

Для його захисту встановлюється окреме струминне реле (наприклад, типу URF), яке реагує виключно на швидкість руху масла у трубопроводі РПН. Контакти цього реле підключаються до RET670 і налаштовуються виключно на миттєве відключення трансформатора з усіх сторін при виникненні аварійного дугового процесу всередині перемикача ступенів.

При важких внутрішніх КЗ швидкість виділення газу та зростання тиску в баку можуть випередити швидкість спрацювання газового реле, що загрожує розривом зварних швів бака трансформатора та пожежею.

Для скидання надлишкового тиску на баку встановлюються запобіжні клапани або мембранні диски (головні вихлопні труби). Кінцеві вимикачі цих пристроїв замикаються при фізичному спрацюванні механізму скидання тиску. Сигнал передається в термінал RET670, логіка якого дублює команду другого ступеня газового захисту на повне знеструмлення трансформатора.

Для моніторингу теплового стану трансформатора використовуються стрілочні термосигналізатори (наприклад, типу ТКП-160), датчики яких занурені у верхні пласти масла.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 53   |

Додатково в термінал заводяться сигнали від датчика мінімального рівня масла в розширювачі (герконові контакти масловиказника), що запобігає оголенню обмоток при витіканні ізоляційної рідини.

Переваги інтеграції в ABB RET670:

- Програмне блокування від вібрацій: логічна схема внутрішньої конфігурації дозволяє задати індивідуальний час фільтрації (10...20 мс) для дискретних входів, що повністю виключає хибні вимкнення трансформатора при струсах бака під час наскрізних КЗ чи землетрусів.

- Фіксація послідовності подій (SOE): мікропроцесорне реле реєструє замикання контактів технологічних захистів із точністю до 1 мс. Це дозволяє під час аналізу аварії чітко визначити, що саме сталося першим — електричне КЗ в обмотці (спрацював диференційний захист) чи механічний процес (спрацювало газове реле).

- Резервування через GOOSE: при отриманні сигналу від відключаючого ступеня газового захисту термінал не лише замикає свої вихідні реле на трип-котушки вимикачів, а й миттєво дублює цю команду цифровими GOOSE-повідомленнями в загальну мережу підстанції.

### **3.4 Комунікаційні можливості та цифрова інтеграція за стандартом IEC 61850**

Реконструкція системи релейного захисту та автоматики підстанції 110/35/10 кВ передбачає відмову від класичних радіальних кабельних зв'язків вторинної комутації та перехід до побудови Цифрової підстанції (Digital Substation). Інтелектуальний електронний пристрій (ІЕП) ABB RET670 має розвинену архітектуру зв'язку, яка базується на повному впровадженні міжнародного стандарту IEC 61850 (частини 8-1 та 9-2).

Зазначений підхід дозволяє об'єднати захист триобмоткового силового трансформатора, приєднання розподільних пристроїв усіх рівнів напруги та верхній рівень диспетчерського керування (SCADA) в єдиний високошвидкісний інформаційний простір.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 54   |

Для забезпечення надійності інформаційного обміну ЛОМ підстанції розподіляється на два незалежні функціональні рівні відповідно до трирівневої моделі стандарту IEC 61850:

1. Шина станції (Station Bus — IEC 61850-8-1): призначена для зв'язку між терміналами РЗА (рівень приєднань) та обладнанням верхнього рівня підстанції (рівень станції). До неї підключаються сервери бази даних, інженерні робочі станції, SCADA-система та шлюзи зв'язку з диспетчерським центром енергосистеми.

2. Шина процесу (Process Bus — IEC 61850-9-2): використовується для передачі миттєвих оцифрованих значень струмів та напруг (Sampled Values) від електронних вимірювальних трансформаторів або аналогово-цифрових пристроїв сполучення з об'єктом (Merging Units) безпосередньо до обчислювальних органів терміналу RET670.

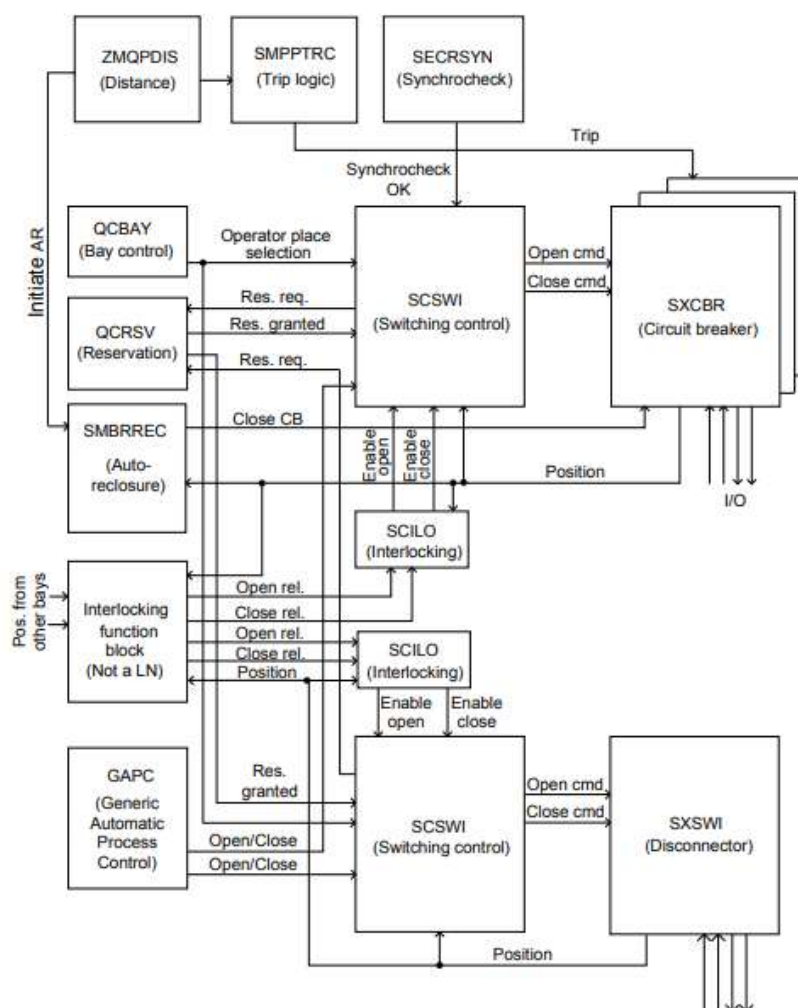


Рисунок 3.10 - Приклад організації міжфункціональних зв'язків (взаємодії функцій) на рівні типового приєднання

Апаратна реалізація інтерфейсів зв'язку в ABB RET670 базується на використанні вбудованих оптичних модулів з роз'ємами типу LC для багатомодового волокна, що працюють на швидкості 100 Мбіт/с (стандарт 100Base-FX). Оптичні канали повністю виключають вплив потужних електромагнітних завад, які виникають при комутаціях високовольтного обладнання в РУ-110 кВ.

Оскільки затримка або втрата пакетів даних у цифрових колах релейного захисту є неприпустимою, термінал RET670 підтримує апаратне резервування мережних інтерфейсів безперервної дії відповідно до стандарту IEC 62439-3:

Протокол PRP (Parallel Redundancy Protocol): термінал підключається одночасно до двох повністю дубльованих, фізично розділених локальних мереж Ethernet (Мережа А та Мережа В). Пристрій RET670 дублює кожен пакет даних і відправляє його в обидві мережі паралельно. Термінал-отримувач приймає той пакет, який надійшов першим, а копію, що прийшла із запізненням, автоматично відкидає. При повному обриві кабелю в одній із мереж час відновлення зв'язку дорівнює 0 мс, тобто передача даних не переривається ні на мить.

Протокол HSR (High-availability Seamless Redundancy): застосовується при побудові мережі за топологією «кільце». Пакети даних відправляються в кільце в обох напрямках одночасно. При пошкодженні будь-якої ділянки оптичного кільця інформація все одно миттєво доходить до адресата через зворотний бік обходу.

Протокол MMS (Manufacturing Message Specification) використовується для передачі інформації з низьким пріоритетом за часом доставки (до 100 мс). Через MMS-звіти термінал RET670 передає на сервер SCADA:

- поточні діючі значення струмів усіх трьох сторін трансформатора, активну та реактивну потужність, положення анцапф РПН;
- сигнали про спрацювання першого ступеня газового захисту, перегріву масла чи несправності вторинних кіл напруги (несиметрія);
- журнали подій та файли аварійних осцилограм у міжнародному форматі COMTRADE для подальшого аналізу службою РЗА.

Пакети GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events) призначені для миттєвої передачі критично важливих логічних команд керування та блокування

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 56   |

між різними терміналами підстанції. Оскільки ці повідомлення працюють напряду на рівні Layer 2 моделі OSI, час їхньої доставки в мережі не перевищує 3 мс.

У проекті реконструкції підстанції через GOOSE-пакети реалізовано такі ключові інженерні рішення:

Робота захистів від КЗ на вимкнення: при спрацюванні диференційного захисту трансформатора (87Т) чи відключаючого ступеня газового захисту (63) термінал RET670 миттєво формує GOOSE-повідомлення з прапором «Trip». Цей цифровий сигнал одночасно зчитується лінійними терміналами вводів 35 кВ та 10 кВ, які видають імпульс на котушки відключення відповідних вимикачів.

Логічний захист шин (ЛЗШ-10 кВ): при виникненні КЗ на відхідному фідері 10 кВ лінійне реле фіксує пуск струмових органів і миттєво надсилає GOOSE-повідомлення блокування на термінал RET670 (сторона НН трансформатора), забороняючи йому роботу з мінімальним часом. Якщо КЗ сталося на шинах — лінійні реле мовчать, GOOSE-блокування не надходить, і RET670 вимикає ввід із витримкою 0,1 с.

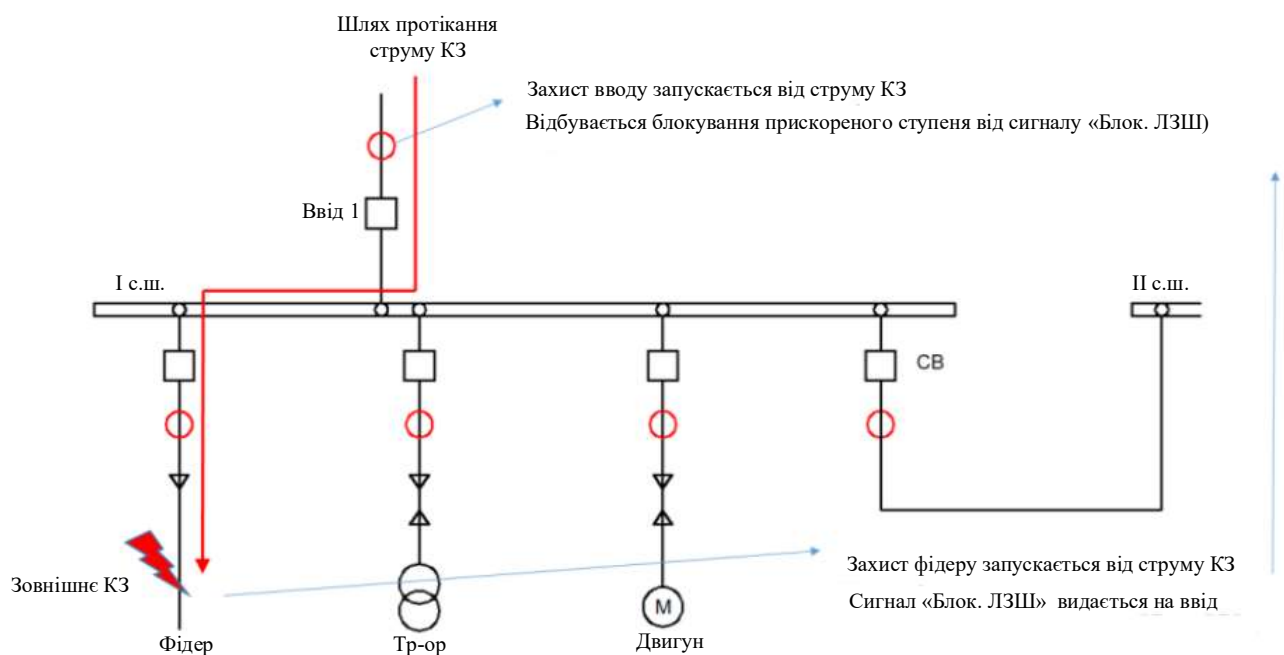


Рисунок 3.11 – Робота ЛЗШ при КЗ на фідері

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 57   |

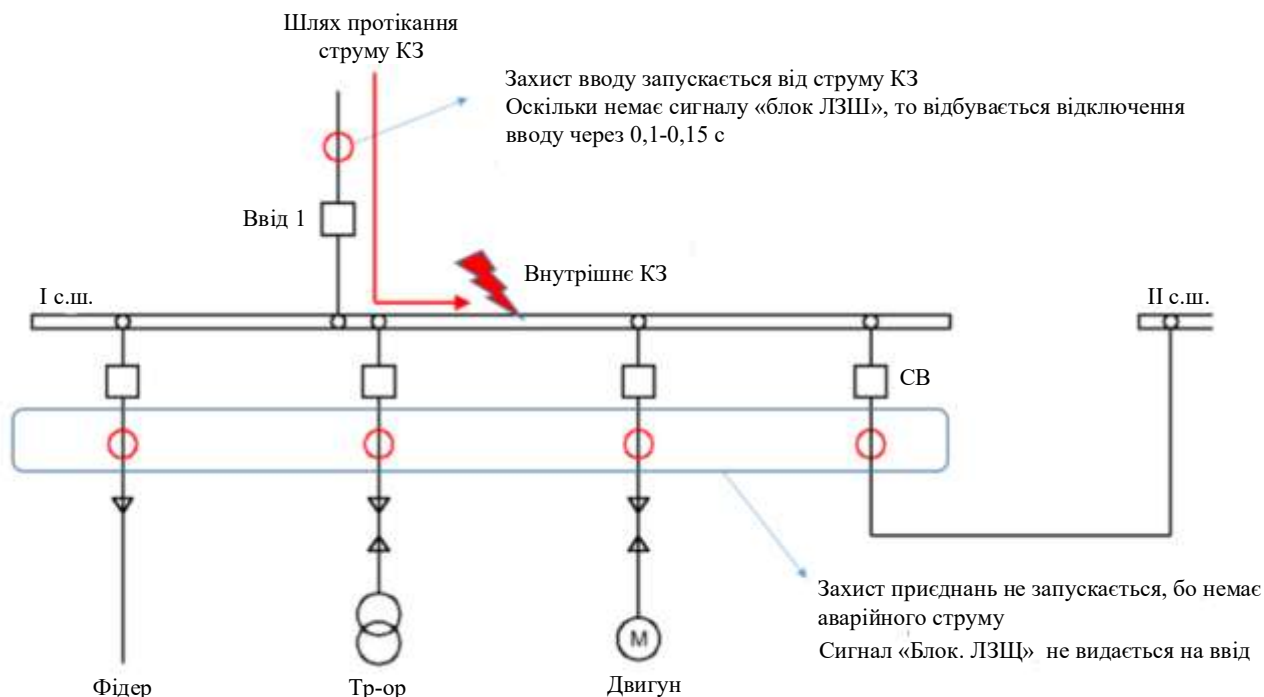


Рисунок 3.12 – Робота ЛЗШ при КЗ на шинях

Пуск УРОВ: при видачі команди на трип вимикача 110 кВ термінал RET670 запускає внутрішній таймер контролю струму. Якщо вимикач відмовив (струм не зник), RET670 надсилає GOOSE-сигнал «УРОВ пуск» на суміжні термінали ліній 110 кВ для відключення вищестоящих вимикачів протилежних кінців ліній.

Для забезпечення коректного аналізу аварійних процесів усі пристрої підстанції повинні мати єдину шкалу часу. Термінал ABB RET670 підтримує протокол синхронізації PTP (Precision Time Protocol) відповідно до стандарту IEEE 1588v2.

Завдяки підключенню до загальнопідстанційного сервера точного часу (GPS/ГЛОНАСС-приймача) точність міток часу для кожної події та кожної вибірки осцилографа в реле становить менше 1 мкс, що повністю задовольняє вимогам щодо побудови систем РЗА та коректного співставлення подій під час ліквідації системних аварій.

### Висновки до розділу 3

Обґрунтовано структуру оновленого комплексу РЗА, яка базується на принципі повної апаратної незалежності та резервування. Розділення функцій основного (диференційного) та резервних (дистанційного, МСЗ) захистів за окремими фізичними шафами, а також організація незалежних кіл живлення оперативного струму

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 58   |

та вимірювальних кернів ТС дозволили звести до мінімуму ризик повної відмови системи захисту трансформатора.

Впроваджено сучасний інтелектуальний електронний пристрій ABB RET670 (серія Relion®) як центральний елемент основного захисту. Використання МП-терміналу дозволило реалізувати високонадійний повздовжній диференційний захист (ANSI 87T) із програмною компенсацією кута зсуву фаз обмоток без застосування складних зовнішніх схем з'єднання ТС, а також високочутливий обмежений захист від заземлень (REF, ANSI 87N).

Реалізовано надійну відбудову захисту від перехідних процесів, зокрема від кидків струму намагнічування (ікруш-струмів) при ввімкненні трансформатора на холостий хід та режимів перезбудження магнітопроводу. Це забезпечено завдяки вбудованим цифровим алгоритмам швидкого перетворення Фур'є, які миттєво блокують захист при виявленні критичного вмісту другої та п'ятої гармонік у спектрі струму.

Проектовано повну інтеграцію технологічних (неелектричних) захистів трансформатора (газового захисту бака, струминного захисту РПН, датчиків тиску та термосигналізаторів) безпосередньо у модулі дискретних входів терміналу RET670. Це дозволило повністю відмовитися від застарілих кіл проміжних електромеханічних реле, виключити хибні спрацювання через брязкіт контактів та забезпечити точну реєстрацію послідовності подій (SOE) з дискретністю до 1 мс.

Розроблено сучасну комунікаційну архітектуру за стандартом IEC 61850. Організація передачі високошвидкісних горизонтальних GOOSE-повідомлень забезпечила миттєву взаємодію між RET670 та терміналами ліній для ліквідації КЗ, координації логічного захисту шин (ЛЗШ) та пуску автоматики УРОВ без прокладання додаткових мідних кабелів.

Розроблені рішення дозволяють суттєво підвищити надійність електропостачання споживачів, зменшити час ліквідації аварій, забезпечити повну автоматизацію та спостережуваність підстанції з її подальшим інтегруванням у загальну SCADA-систему енергооб'єднання.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 59   |

## ВИСНОВКИ

Проведений комплексний аналіз технічного стану та умов експлуатації підстанції напругою 110/35/10 кВ. Виконано загальний опис обладнання. На підстанції встановлено два трифазні триобмоткові силові трансформатори типу ТДТН-40000/110, номінальна потужність кожного трансформатора становить 40 МВА. В якості додаткових трансформаторів встановлені ТД-10000/35.

Система збірних шин відкритого розподільного пристрою 110 кВ виконується за схемою з однією секціонованою вимикачем системою шин.

На відкритому розподільному пристрої 110 кВ як головний комутаційний апарат лінійних приєднань та вводів силових трансформаторів використовується високовольтний вимикач типу ВД-110.

Для організації видимого розриву та заземлення відключених ділянок РУ-110 застосовуються двоколонкові роз'єднувачі горизонтально-поворотного типу серії РНДЗ-110/1000.

Виконано розрахунки струмів КЗ на шинах ПС, отримані результати зведено в таблицю.

Обґрунтовано структуру оновленого комплексу РЗА, яка базується на принципі повної апаратної незалежності та резервування. Розділення функцій основного (диференційного) та резервних (дистанційного, МСЗ) захистів за окремими фізичними шафами, а також організація незалежних кіл живлення оперативного струму та вимірювальних кернів ТС дозволили звести до мінімуму ризик повної відмови системи захисту трансформатора.

Впроваджено сучасний інтелектуальний електронний пристрій ABB RET670 (серія Relion®) як центральний елемент основного захисту. Використання МП-термінала дозволило реалізувати високонадійний повздовжній диференційний захист (ANSI 87T) із програмною компенсацією кута зсуву фаз обмоток без застосування складних зовнішніх схем з'єднання ТС, а також високочутливий обмежений захист від заземлень (REF, ANSI 87N).

Проектовано повну інтеграцію технологічних (неелектричних) захистів трансформатора (газового захисту бака, струминного захисту РПН, датчиків тиску та

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 60   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

термосигналізаторів) безпосередньо у модулі дискретних входів термінала RET670. Це дозволило повністю відмовитися від застарілих кіл проміжних електромеханічних реле, виключити хибні спрацювання через брязкіт контактів та забезпечити точну реєстрацію послідовності подій (SOE) з дискретністю до 1 мс.

Розроблено сучасну комунікаційну архітектуру за стандартом IEC 61850. Організація передачі високошвидкісних горизонтальних GOOSE-повідомлень забезпечила миттєву взаємодію між RET670 та терміналами ліній для ліквідації КЗ, координації логічного захисту шин (ЛЗШ) та пуску автоматики УРОВ без прокладання додаткових мідних кабелів.

Розроблені рішення дозволяють суттєво підвищити надійність електропостачання споживачів, зменшити час ліквідації аварій, забезпечити повну автоматизацію та спостережуваність підстанції з її подальшим інтегруванням у загальну SCADA-систему енергооб'єднання.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
|     |      |          |       |      |                   | 61   |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   |      |

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Васильєв Г. Г. Автоматизація та релейний захист в енергетиці: навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 312 с.
2. Жуков В. А. Релейний захист і автоматика електричних систем : підручник. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. 420 с.
3. Кісельов А. С., Муха А. М. Електричні мережі та системи : підручник. Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2022. 510 с.
4. Малиновський В. Г. Експлуатація електричних підстанцій: навч. посіб. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2019. 280 с.
5. Постанови НКРЕКП про затвердження Кодексу систем розподілу. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=14603> (дата звернення: 06.05.2026).
6. РЕЛСІС. Регулятор напруги для трансформаторів з РПН РЗЛ-05.РПН. URL: <https://reلسis.ua/products/rzl-05-rpn/> (дата звернення: 06.05.2026).
7. Чорний О. П. Автоматизація енергетичних систем: підручник. Київ : НАУ, 2021. 380 с.
8. Y. Trotsenko, A. Nesterko, Y. Peretyatko, M. Dixit. “Mitigation of environmental impacts of electricity transmission: effect of deciduous trees on electric field caused by overhead power lines”. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2022, Issue 1(132), pp. 203-211. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.1.27>
9. Бардик Є. І., Безбереж'єв Ю. В. Перехідні електромагнітні процеси в електроенергетичних системах: Методичні вказівки. – Київ: ФЕА НТУУ «КПІ», 2013. – 33 с.
- 10.Рішення АББ для розподільчих мереж. URL: <https://new.abb.com/docs/librariesprovider25/catalogues/abb-build-ready-l.pdf?sfvrsn=2>
- 11.UniGear ZS3.2 metal-enclosed switchgear. URL: <https://searchext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1YHD000000A0993&Language-Code=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- 12.Бердник В. А. Автоматичні регулятори напруги та їх застосування в електричних мережах : монографія. Одеса: ОНПУ, 2017. 250 с.

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 62   |

- 13.Високовольтне обладнання : довідник / за ред. І. С. Іванова. Київ : Техніка, 2015. 650 с.
- 14.Гаврилов О. М. Релейний захист і автоматика електричних станцій та підстанцій: підручник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 360 с.
- 15.Енергосистеми та мережі : підручник / за ред. В. А. Світличного. Київ: Вища школа, 2016. 480 с.
- 16.Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Харків: Форт, 2020. 736 с.
- 17.Трансформатори силові. Загальні технічні умови : ДСТУ 3463-96. Київ: Держстандарт України, 1996. 72 с.
- 18.J. Peretyatko, Y. Trotsenko, A. Nesterko, M. Dixit, “Calculation of voltage transformer parameters for mathematical model of induction channel furnace”, Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2022, Issue 4(135), pp. 45-52. | <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.6>.
- 19.Oleksandr Yandulskiy, Volodymyr Hulyi, Artem Nesterko, Mykhailo Kovalenko, Oleksandr Tymokhin (2025). Improving the efficiency of secondary load frequency control in a power system considering internal tie-line power exchanges. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4, 8 (136), pp. 6-15 DOI: 10.15587/1729-4061.2025.336113, <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/336113>, ISSN: 1729-4061, 1729-3774 10.15587/1729-4061.2025.336113.
20. Transformer protection RET670 ANSI Application manual. URL: <https://manuals.plus/wp-content/uploads/2023/01/ABB-RET670-Transformer-Protection-ANSI-Application-User-Manual.pdf> (дата звернення: 06.05.2026).

|     |      |          |       |      |                   |      |
|-----|------|----------|-------|------|-------------------|------|
|     |      |          |       |      | 141.EK2106.006.ДБ | Арк. |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підп. | Дата |                   | 63   |