

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Розробка лабораторного стенду для імітації автоматичного повторного
ввімкнення електромережі на базі мікропроцесорного пристрою RER 615**

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕТм-61

спеціальності 141 – Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Головко А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Оробчук Б.Я.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Коваль В.П.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Микитишн А.Г.

(прізвище та ініціали)

Тернопіль 2025

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

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Коваль В.П.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« »

2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)

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

студенту ГОЛОВКУ Андрію Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка лабораторного стенду для імітації автоматичного повторного ввімкнення електромережі на базі мікропроцесорного пристрою RER 615

Керівник роботи Оробчук Богдан Ярославович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

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

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень, 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Технічна документація на мікропроцесорний пристрій релейного захисту RER 615, керівництво користувача, схеми електричні принципові, схеми функціональні, програмне забезпечення пристрою від фірми АВВ

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналітичний розділ

2. Проектно-конструкторський розділ

3. Розрахунково-дослідницький розділ

4. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

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

1. Актуальність теми, предмет і об'єкт дослідження, поставленні задачі та шляхи їх розв'язку

2. Схема структурна лабораторного стенду для імітації аварійних режимів

3. Схема функціональна лабораторного стенду для імітації аварійних режимів

4. Схема електрична принципова лабораторного стенду для імітації аварійних режимів

5. Схема роботи стенду та взаємозв'язок основних функціональних блоків

6. Робота блоку струмового захисту та автоматичного повторного ввімкнення

7. Робота блоку дугового захисту та захисту від замикань на землю

8. Загальні висновки до кваліфікаційної роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гурик О.Я., к.т.н., доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.М., ст. викладач		
Нормоконтроль	Коваль В.П., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання листопад 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент

(підпис)

Головко А.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Оробчук Б.Я.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Головко А.В. Розробка лабораторного стенду для імітації автоматичного повторного ввімкнення електромережі на базі мікропроцесорного пристрою RER 615. 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-61. – Тернопіль: ТНТУ, 2025.

Стор. - 88; рис. - 63; табл. - 1; слайдів – 15; джерел – 30;

В ході роботи спроектовано та виготовлено лабораторний стенд, що дозволяє фізично моделювати роботу реклоузера в режимах коротких замикань та циклів АПВ. Конструкція стенду поєднує силову імітаційну частину, мікропроцесорну систему керування. Для візуалізації режимів роботи впроваджено систему сигналізації, яка надає інформацію про стан комутаційного апарата та аварійні події.

Також увагу приділено реалізації схеми вимірювальних кіл для введення аналогових сигналів струму та напруги, що дозволило забезпечити випробування основних аварійних режимів та подій. Відтворено логіку керування високовольтним вимикачем, яка включає команди увімкнення/вимкнення та алгоритми блокувань АПВ, захистів по напрузі та струму при оперативних перемиканнях або несправності приводу.

Налаштовано конфігурацію терміналу RER615, задані уставки для тестування аварійних режимів. За допомогою засобів РСМ600 і пакету НІТАСНІ адаптовано стандартні функціональні блоки логіки та захисту. Також створено імітатор пружинного приводу для наочної демонстрації системи підзаводу приводу пружини.

Ключові слова: лабораторний стенд, мікропроцесорний пристрій, релейний захист, імітація аварійних режимів, функціональні блоки логіки, функціональні блоки захисту, електричні мережі, АПВ, реклоузер.

ABSTRACT

Holovko A.V. Development of a laboratory test bench for simulating automatic reclosing in the power network based on the RER 615 microprocessor device. 141 – Electric power, electrical engineering and electromechanics; Ivan Pulyuy Ternopil National Technical University. Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering. Department of Electrical Engineering, Group ETm-61. – Ternopil: TNTU, 2025.

Page – 88; Illustrations – 63; Tables – 1; Blueprints – 15; Sources – 30;

During the work, a laboratory stand was designed and manufactured, which allows physically simulating the operation of the recloser in short-circuit and automatic reclosing cycles. The design of the stand combines a power simulation part, a microprocessor control system. To visualize the operating modes, an alarm system was implemented, which provides information about the state of the switching device and emergency events.

Attention was also paid to the implementation of the circuit of measuring circuits for inputting analog current and voltage signals, which allowed testing the main emergency modes and events. The high-voltage circuit breaker control logic was recreated, which includes on/off commands and algorithms for blocking automatic reclosing, voltage and current protection during operational switching or drive malfunction.

The RER615 terminal configuration was configured, and settings were set for testing emergency modes. Using PCM600 tools and the HITACHI package, standard functional blocks of logic and protection were adapted. A spring drive simulator has also been created to visually demonstrate the spring drive winding system.

Keywords: laboratory stand, microprocessor device, relay protection, simulation of emergency modes, functional logic blocks, functional protection blocks, electrical networks, automatic recloser, recloser.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	13
1.1 Аналіз застосування пристроїв цифрового релейного захисту	13
1.2 Основні елементи та структура цифрового релейного захисту	14
1.3 Вибір ІЕП для керування та захисту	19
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	29
2.1 Призначення лабораторного стенду	29
2.2 Концепція створення лабораторного стенду	30
2.3 Розробка каркасу лабораторного стенду	30
2.4 Вибір компонентів для лабораторного стенду	31
3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	45
3.1 Опис схеми та роботи мікропроцесорного пристрою	45
3.2 Електрична схема панелі	47
3.3 Живлення мікропроцесорного пристрою	49
3.4 Положення вимикача та його готовність	49
3.5 Дискретні входи	51
3.6 Дискретні виходи (силові контакти)	52
3.7 Дискретні виходи (сигнальні контакти)	53
3.8 Опис логіки роботи RER615	54
3.9 Розгляд та налаштування конфігурації блоків. Загальні блоки.	56
3.10 Логічні блоки захисту	58
3.11 Логічні блоки контролю	67
3.12 Струмові кола та кола напруги	75
3.13 Проведення тестів захистів панелі	76
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	78
4.1 Заходи безпеки при проведенні лабораторних робіт з стендом	78
4.2 Розрахунок захисного заземлення обладнання лабораторії	80
4.3 Заходи безпеки життєдіяльності в електроустановках	82
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	85
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	86

ВСТУП

Актуальність теми. Підвищення надійності розподільних електричних мереж напругою 6–35 кВ є одним із пріоритетних завдань сучасної української енергетики. Значна частина відключень споживачів у цих мережах спричинена короточасними, нестійкими пошкодженнями, такими як перекриття ізоляції через грозові перенапруги або схльостування проводів. Для боротьби з такими явищами та мінімізації часу перерви в електропостачанні широкого застосування набули реклоузери — інтелектуальні комутаційні апарати, здатні автоматично відключати пошкоджену лінію та виконувати цикли повторного ввімкнення (АПВ). Ефективне використання реклоузерів дозволяє суттєво покращити ключові показники надійності мережі (SAIDI, SAIFI) та автоматизувати процес відновлення живлення без втручання оперативного персоналу.

"Мозком" сучасного реклоузера є мікропроцесорний пристрій релейного захисту та автоматики (РЗА), який реалізує всю логіку його роботи. На відміну від застарілих електромеханічних чи простих мікроелектронних систем, сучасні інтелектуальні електронні пристрої (IED) надають значно ширші можливості. Яскравим представником таких пристроїв є термінал ABB RER615, спеціально розроблений для керування реклоузерами. Він поєднує в собі функції багатоступеневого струмового захисту, спрямованих захистів, розширеної логіки АПВ, функцій вимірювання, осцилографування та віддаленої комунікації. Це перетворює реклоузер з простого автоматичного вимикача на повноцінний елемент систем розподіленої автоматизації та Smart Grid.

Водночас стрімкий технологічний розвиток створює певний розрив між новітнім обладнанням, що впроваджується на енергопідприємствах, та рівнем практичної підготовки фахівців. Налаштування, програмування логіки та експлуатація багатофункціональних пристроїв, як-от RER615, вимагають глибоких знань у галузі цифрової релейної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення. Традиційні методи навчання та застаріла лабораторна база не завжди можуть забезпечити належний рівень компетенцій для роботи з таким складним обладнанням.

У зв'язку з цим виникає гостра потреба у створенні сучасних навчальних інструментів, що дозволяють моделювати реальні процеси в електромережі та відпрацьовувати навички роботи з передовими пристроями РЗА. Розробка лабораторного стенду, що імітує роботу реклоузера на базі мікропроцесорного термінала RER615, є надзвичайно актуальним завданням. Такий стенд стане ефективною платформою для підготовки майбутніх фахівців, дозволяючи їм на практиці вивчати конфігурування захистів, аналізувати аварійні режими та освоювати сучасні підходи до автоматизації розподільних мереж, що є важливим для модернізації енергетичної інфраструктури України.

Мета і завдання досліджень. Мета роботи — розробити діючий макет лабораторного стенду, що відтворює логіку роботи захисту релейної шафи реклоузера на базі сучасного мікропроцесорного реле **RER-615**. Стенд дозволяє проводити дослідження та наочно демонструвати реакцію систем РЗА на різноманітні аварійні режими в електричній мережі.

Основні етапи виконання роботи для досягнення мети:

1. **Дослідження:** Проаналізовано ринок мікропроцесорних пристроїв РЗА.
2. **Проектування:** Розроблено функціональну та електричну схеми, що є основою конструкції стенду.
3. **Реалізація:** Налаштовано та запрограмовано імітацію роботи основних захистів:
 - о максимального струмового;
 - о струмової відсічки;
 - о захисту по напрузі.
4. **Автоматизація:** Реалізовано логіку роботи циклу автоматичного повторного ввімкнення (АПВ).
5. **Тестування:** Розроблено методику імітації аварійних процесів для аналізу роботи системи захисту в динаміці.

Об'єктом дослідження є лабораторний стенд на базі мікропроцесорного реле RER-615 релейної шафи реклоузера.

Предметом дослідження є комплекс різних режимів роботи елемента електричної мережі, відтворених на стенді . Це дозволяє досліджувати розрізнені ситуації на лініях електропередач.

Наукова новизна полягає у розробці методики використання інтерактивного лабораторного стенду для вирішення комплексу прикладних інженерних задач. На відміну від суто теоретичного аналізу, запропонований підхід дозволяє наочно пов'язати технічні дані та внутрішню логіку роботи мікропроцесорного реле з практичними завданнями.

Одержані результати мають практичну цінність, оскільки дозволяють закріпити теоретичні знання та перевірити на практиці алгоритми роботи релейного захисту. Це сприяє глибшому розумінню принципів функціонування систем релейного захисту та набуттю навичок роботи з сучасним обладнанням, що є важливим елементом підготовки майбутніх фахівців у сфері електроенергетики. Потенційною сферою застосування результатів є освітній процес за спеціальностями електроенергетичного профілю.

Апробація результатів кваліфікаційної роботи.

Основні положення роботи і її результати доповідалися на XIII Міжна-родній науково-технічній конференції молодих учених та студентів, 11-12 грудня 2025 р. (м. Тернопіль).

Публікації.

За результатами виконаних досліджень опубліковано 1 тезу доповідей «Розробка лабораторного навчального стенду на базі мікропроцесорного реле RER-615». Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей XIII Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11-12 груд-ня 2025) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2025.

Структура роботи.

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (39 найменувань).

Загальний обсяг текстової частини: 85 сторінки, 1 таблиць, 63 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз застосування пристроїв цифрового релейного захисту

У сучасних електроенергетичних системах України все ще експлуатуються релейні захисти на електромеханічній основі, проте в останні десятиліття спостерігається поступовий перехід до використання мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики (МП РЗА). Нові та реконструйовані об'єкти електропостачання проектуються вже з урахуванням цифрових технологій, що дозволяє значно підвищити надійність та функціональність захистів. При цьому принципові схеми побудови релейного захисту залишаються незмінними, а розвиток стосується переважно методів обробки сигналів та алгоритмів роботи.

Мікропроцесорні реле, зокрема серії **RER615**, об'єднують у собі декілька ключових функцій: релейний захист, автоматику, вимірювання, реєстрацію аварійних подій, керування вимикачами та комунікацію з системами АСУ ТП. Це дозволяє застосовувати один пристрій замість комплексу обладнання попередніх поколінь. Важливим фактором є й зменшення габаритів та маси пристроїв при значному розширенні їх функціональних можливостей.

Зростання рівня функціональної насиченості цифрових реле супроводжується як позитивними, так і проблемними аспектами. До переваг належать:

- ⌚ висока точність та чутливість захистів;
- ⌚ можливість гнучкого налаштування параметрів;
- ⌚ інтеграція з системами диспетчерського керування через сучасні протоколи зв'язку (IEC 61850 тощо);
- ⌚ автоматичне збереження та передача звітів про аварійні події;
- ⌚ спрощення процесу модернізації енергетичних об'єктів.

Разом з тим існують і труднощі: складність програмного забезпечення та інтерфейсу, наявність великої кількості додаткових функцій, які не завжди використовуються на практиці, що ускладнює роботу персоналу та підвищує ризик помилок. Крім того, проблемним питанням є ремонтпридатність пристроїв – через поверхневий монтаж, високу щільність друкованих плат та відсутність

принципових схем від виробників відновлення працездатності окремих модулів є складним і дорогим завданням.

Ще одним важливим аспектом є вартість МП РЗА. Пристрої, такі як **ABB RER615**, закупаються зазвичай на конкурсній основі, і для їх ефективного використання потрібна кваліфікована підготовка обслуговуючого персоналу. Надійність окремих блоків пристрою також різниться: найбільш навантаженими є джерела живлення та вихідні модулі, тоді як блоки з вимірювальними трансформаторами зазвичай відмовляють значно рідше.

Враховуючи ці особливості, виникає потреба у створенні **імітаційних лабораторних стендів**, які дозволяють відпрацьовувати аварійні режими, досліджувати алгоритми роботи захистів і навчати персонал без ризику пошкодження реального обладнання. Саме на базі пристрою **RER615**, що поєднує сучасні цифрові технології та широкий функціонал, можливо реалізувати універсальний навчально-демонстраційний стенд. Такий підхід забезпечує практичне засвоєння принципів роботи цифрових захистів, їх конфігурування та діагностики, що є надзвичайно актуальним у процесі підготовки фахівців для енергетичної галузі.

1.2 Основні елементи та структура цифрового релейного захисту

Цифрові пристрої релейного захисту нового покоління відрізняються від традиційних систем не лише принципом дії, а й структурою побудови. Вони поєднують у собі функції захисту, автоматики, контролю та комунікації, що дозволяє забезпечити комплексний підхід до безпеки та керування електричними мережами. Одним із представників таких систем є пристрій **ABB RER615**, який призначений для захисту ліній, трансформаторів, шин і інших елементів розподільних мереж середньої напруги.

Вхідна інформація. У роботі цифрового релейного захисту головну роль відіграє процес збору, аналізу та обробки інформації про стан енергетичного об'єкта.

До вхідних даних пристрою ABB RER615 належать:

- ⌚ **Аналогові сигнали** від трансформаторів струму (СТ) і напруги (VT), що відображають реальні параметри мережі — миттєві значення струмів, напруг, потужності та частоти. Ці сигнали надходять на аналого-цифрові перетворювачі, де вони оцифровуються для подальшої обробки мікропроцесором.
- ⌚ **Дискретні входи**, які приймають інформацію про положення комутаційних апаратів (вимикачів, роз'єднувачів), стан інших пристроїв захисту або логічні команди з системи автоматики.
- ⌚ **Цифрові сигнали**, що передаються по комунікаційних каналах між пристроями різних типів, наприклад, для реалізації схем блокування, обміну інформацією між лінійними захистами або підключення до системи SCADA.
- ⌚ **Команди управління та налаштування**, які вводяться оператором із панелі керування, з комп'ютера через сервісний інтерфейс або дистанційно із верхнього рівня системи автоматизованого керування (АСУТП).

Вихідна інформація. Після аналізу отриманих сигналів мікропроцесор пристрою формує відповідні вихідні дані:

- ⌚ **Дискретні вихідні сигнали** — це команди на спрацювання вимикачів, запуск резервних захистів, подачу сигналізації або блокування певних функцій;
- ⌚ **Цифрова інформація**, що передається через комунікаційні інтерфейси для обміну з іншими мікропроцесорними пристроями або центральними системами керування;
- ⌚ **Інформаційні повідомлення** про стан об'єкта, спрацювання захистів, результати самодіагностики та виміряні параметри струмів, напруг, потужностей і частот. Ця інформація може виводитись на дисплей, записуватись у внутрішню пам'ять або передаватись до SCADA-системи.

Основні функціональні елементи пристрою ABB RER615

Цифровий релейний захист складається з низки взаємопов'язаних апаратних і програмних модулів, кожен з яких виконує окрему функцію:

- ⌚ **Аналогові входи** — забезпечують прийом і попередню обробку сигналів від трансформаторів струму та напруги. Вбудовані фільтри усувають гармоніки та перешкоди, забезпечуючи високу точність вимірювань.
- ⌚ **Мікропроцесорний блок** — основний обчислювальний елемент, який здійснює цифрову обробку сигналів, виконує алгоритми порівняння з уставками, приймає рішення щодо спрацювання захисту та формує вихідні сигнали.
- ⌚ **Дискретні входи та виходи** — призначені для логічного обміну сигналами між пристроями, отримання команд блокування або подачі сигналів на комутаційні апарати.
- ⌚ **Панель керування** — містить клавіатуру та дисплей, що дозволяють оператору виконувати локальні налаштування, спостерігати за станом захисту, переглядати аварійні звіти й журнали подій.
- ⌚ **Сервісний інтерфейс (Front Port)** — використовується для підключення персонального комп'ютера при налагодженні, тестуванні або оновленні програмного забезпечення пристрою.
- ⌚ **Комунікаційні інтерфейси (Ethernet, RS-485, оптичні канали)** — забезпечують інтеграцію захисту у цифрові підстанції та системи дистанційного моніторингу.
- ⌚ **Функціональний інтерфейс обміну** — дозволяє пристроям на протилежних кінцях лінії обмінюватися сигналами, що підвищує точність і швидкодію схем релейного захисту.
- ⌚ **Система самодіагностики** — постійно контролює працездатність апаратури, модулів живлення, вхідних і вихідних кіл, а також реєструє можливі відмови.

Загальна схема елементів та функціональних блоків в мікропроцесорних приладах релейного захисту сьогодення схожа та має багато спільного. На зображеннях нижче зображено приблизні блоки для більшості таких пристроїв.

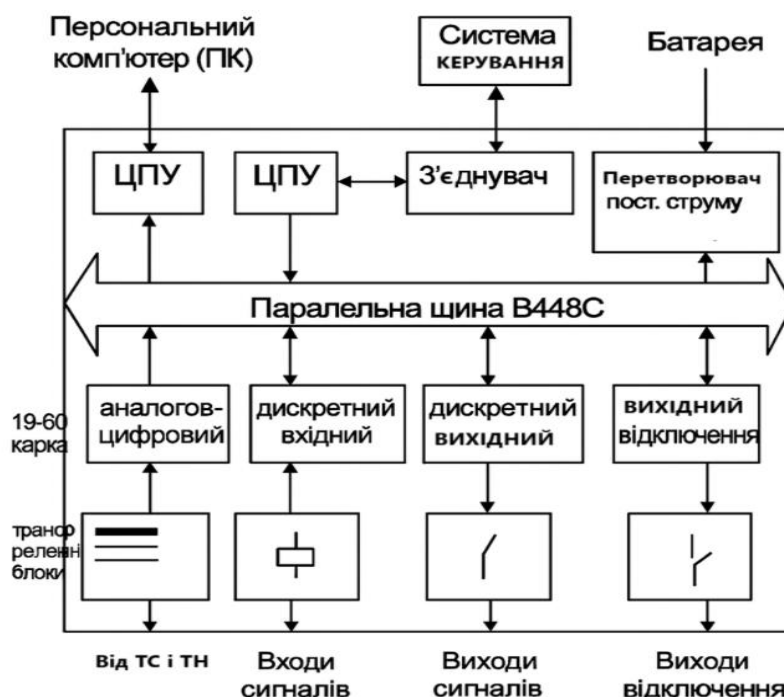
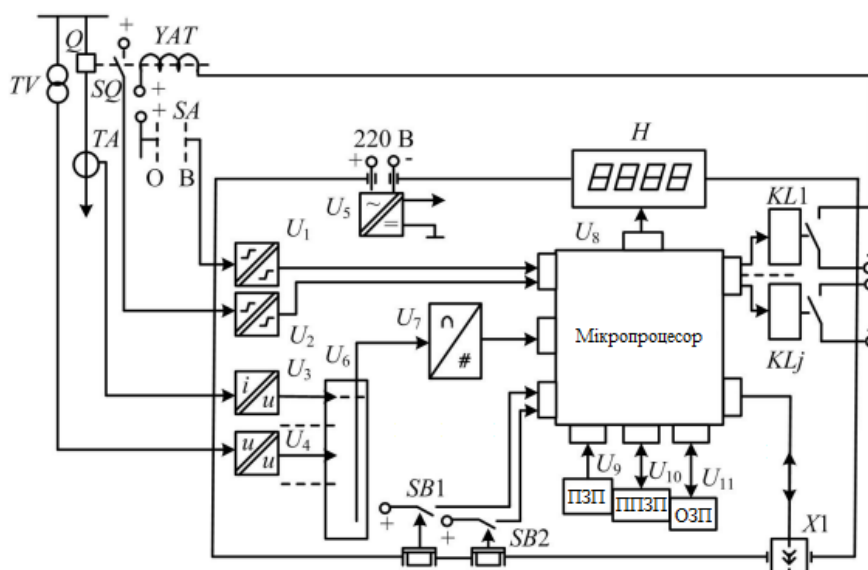


Рисунок 1.1 - Блоки, входи, виходи мікропроцесорного пристрою



1.2 - Структурна схема цифрового пристрою релейного захисту.

Отримані аналогові та дискретні сигнали проходять оцифрування і надходять до мікропроцесорного блоку, де виконується їх обробка за вбудованими алгоритмами. У разі виявлення аварійного режиму мікропроцесор формує вихідні сигнали для відключення пошкодженої ділянки мережі. Вся інформація про подію зберігається в пам'яті пристрою для подальшого аналізу. Обмін даними між окремими пристроями релейного захисту здійснюється через

стандартні протоколи зв'язку, що дозволяє координувати дії кількох захистів у межах однієї підстанції або мережевої ділянки.

Структурна схема цифрового пристрою релейного захисту відображає взаємодію основних функціональних елементів системи. Сигнали струму і напруги надходять від трансформаторів струму (ТС) і напруги (ТН) до аналогово-цифрового перетворювача (АЦП), який переводить їх у цифрову форму. Потім мікропроцесор (ЦП) виконує обробку даних, аналізує параметри мережі та визначає аварійні режими.

Отримана інформація передається до системи керування, де здійснюється моніторинг, параметрування і передача команд. Якщо виявлено несправність, вихідний блок відключення подає сигнал на виконавчі механізми для відключення пошкодженої ділянки.

Живлення пристрою забезпечує перетворювач, який стабілізує напругу для всіх внутрішніх модулів.

1.3 Вибір ІЕП (інтелектуальний електронний пристрій) для керування та захисту

Ринок ІЕП сьогодні представлений широким спектром пристроїв різних виробників, які відрізняються архітектурою, функціональними можливостями та рівнем інтеграції з системами автоматизованого диспетчерського керування. До найбільш поширених напрямів розвитку таких пристроїв належать: підвищення точності цифрової обробки сигналів, впровадження відкритих комунікаційних протоколів (наприклад, ІЕС 61850), збільшення кількості вимірювальних каналів і реалізація функцій самодіагностики.

При виборі ІЕП для енергетичного об'єкта враховуються такі фактори, як номінальні параметри мережі, вимоги до часу спрацювання, кількість контрольованих приєднань, наявність резервних функцій, а також сумісність із існуючою системою керування. Окрім технічних характеристик, важливими є також надійність, простота налаштування та можливість оновлення програмного забезпечення.

Важливо враховувати, що кожна енергетична установка має свої індивідуальні параметри. Наприклад умови роботи суттєво відрізняються залежно від довжини лінії, рівня навантаження та характеру споживачів. Для коротких міських ліній важливо забезпечити точне селективне спрацювання та мінімальний час відновлення живлення, тому універсального підходу до переоснащення систем релейного захисту не існує. У процесі впровадження ІЕП необхідно забезпечити електромагнітну сумісність обладнання, адаптацію нових схем до існуючих систем автоматики, а також ретельну перевірку надійності та стабільності роботи пристроїв в умовах реальної експлуатації.

Сучасні ІЕП, окрім основної функції аварійного відключення, виконують низку додаткових завдань: здійснюють реєстрацію та аналіз аварійних подій, зберігають осцилограми, забезпечують віддалений моніторинг та обмін даними через цифрові інтерфейси. У деяких моделях реалізовані спеціальні функції — наприклад, випереджальне відключення електродвигунів при втраті стійкості чи резервування відмов суміжних захистів. Такі можливості значно розширюють межі традиційного релейного захисту та сприяють підвищенню надійності енергосистеми в цілому.



1.3 Релейна шафа, яка встановлюється біля опори і на якій знаходиться реклоузер

Разом із тим, упровадження мікропроцесорних пристроїв потребує додаткових етапів конфігурування, параметризації та тестування, що вимагає підготовленого персоналу й відповідного програмного забезпечення. Тому заміну електромеханічних пристроїв на цифрові системи доцільно здійснювати поетапно, з урахуванням технічного стану об'єкта та накопиченого досвіду експлуатації.

Перед тим як почати розглядати варіанти варто порівняти які переваги надасть впровадження ІЕП в систему, також не варто забувати про недоліки які можуть виникнути в процесі експлуатації або навіть ще до неї.

Переваги :

- Висока точність та швидкодія — цифрова обробка сигналів забезпечує мінімальний час спрацювання та точне виявлення аварій.
- Багатофункціональність — один пристрій може виконувати функції кількох електромеханічних реле (захист, автоматика, вимірювання, реєстрація подій, телеметрія).
- Самодіагностика та журнал подій — ІЕП ведуть внутрішній моніторинг, зберігають осцилограми, повідомляють про несправності або втрату живлення.
- Гнучке налаштування — усі параметри легко змінюються через програмне забезпечення, без механічного втручання.
- Висока інтегрованість — підтримка комунікаційних протоколів (IEC 61850, Modbus, DNP3 тощо) дозволяє інтегрувати ІЕП у SCADA чи АСКЕ.
- Зменшення габаритів і кількості обладнання — один ІЕП замінює цілий щит із традиційних реле.

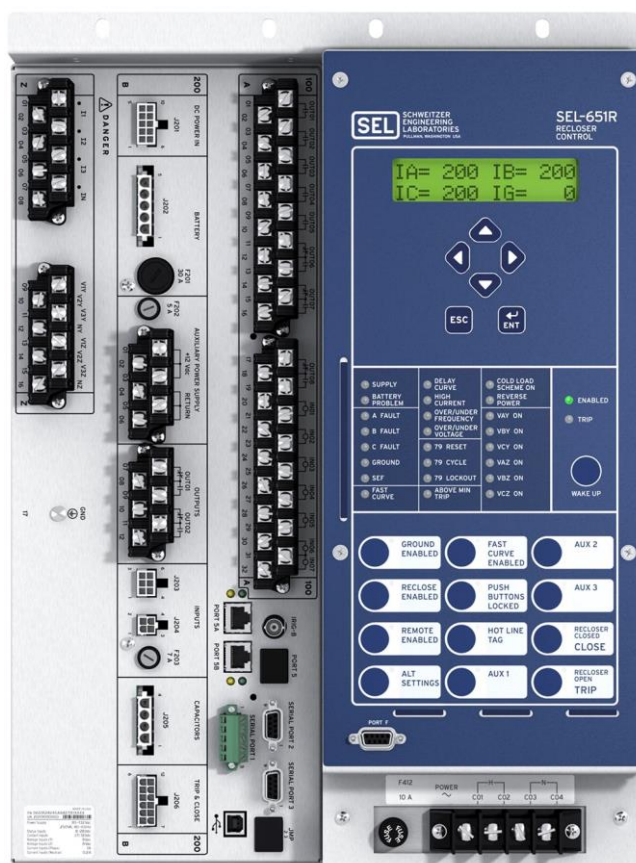
Недоліки :

- Можливість кіберзагроз — при підключенні до мережі з'являється ризик несанкціонованого доступу або зміни параметрів.
- Висока початкова вартість — вартість самого пристрою, ПЗ, ліцензій і навчання персоналу може бути значною.
- Складність ремонту — у разі відмови пристрій полагодити на місці майже не можливо, а сам ремонт займає багато часу і може бути досить дороговартісним.

Можна вважати, що недоліки не є настільки критичними, звичайно, що кіберзагрозами не варто нехтувати, проте IEC 61850, досить захищений стандарт який використовують багато країн світу. Також варто використовувати складні паролі, а ще IEC 61850 дає можливість виявляти підозру активність та попереджувати про зміни. Щодо вартості, то так, це не є дешево, але за ефективність, точність, швидкодію та можливість дистанційного керування потрібно платити. Підсумовуючи доцільність впровадження таких пристроїв в електромережі, можна зазначити, що ІЕП є важливим кроком у напрямку цифровізації та підвищення надійності енергосистем.

А зараз давайте розглянемо, що нам пропонують іноземні компанії та українські підприємства. З закордонних країн лідерами з виготовлення подібних приладів є Schweitzer Engineering Laboratories (США), Siemens (Німеччина), ABB (Швеція), Schneider Electric (Франція). На даному етапі розвитку українського ринку електротехнічного обладнання вітчизняні підприємства поки що не виготовляють спеціалізовані реле, призначені безпосередньо для керування та захисту реклоузерів. Існуючі розробки, такі як пристрої компаній «РЗА Системз», «Релсі» чи «ПромАвтоматика Вінниця», можуть частково виконувати окремі функції реклоузера, проте вони не забезпечують повного комплексу необхідних можливостей — комунікаційних протоколів, адаптивної логіки та інтегрованих систем дистанційного керування.

Schweitzer Engineering Laboratories пропонує SEL-651R. Який забезпечує хороший захист та передачу даних для автоматичної реконфігурації мережі, трифазне та однофазне відключення, а також низку інших функцій, необхідних при розподілі електроенергії та автоматизації. Це пристрій із високою надійністю, відомий своєю стабільною роботою навіть у важких кліматичних умовах. SEL-651R підтримує різні типи протоколів зв'язку (включно з DNP3, IEC 61850), має потужні можливості самодіагностики та просте програмування логіки керування. Головна перевага цього реле — висока надійність та простота обслуговування, що робить його популярним серед експлуатуючих компаній у США та Канаді. Проте вартість і орієнтованість під американські стандарти часто ускладнюють його інтеграцію у наших електромережах.



1.4 SEL-651R – від Schweitzer Engineering Laboratories

MiCOM (Schneider Electric) представляє серію P44x. Ці пристрої вирізняються гнучким налаштуванням захистів, широкими можливостями комунікації та інтеграцією у складні енергосистеми. Пристрої цієї серії підтримують різні Ethernet- та послідовні протоколи обміну даними, включаючи стандарт IEC61850, а також оснащені багатомовним інтерфейсом для користувача (англійська, французька, німецька, іспанська та китайська). Можливості захисту можна розширити за допомогою програмованих логічних схем, реалізованих у пристрої. Модельний ряд характеризується високоефективними чотирьохполюсними (полігональними) або *tho*-реле з зонами блокування навантаження, широким набором схем телезахисту, функцією сигналізації коливань потужності, блокуванням та багаторазовим автоматичним повторним включенням із перевіркою синхронізму. Schneider Electric давно зарекомендував себе як надійний виробник високотехнологічного обладнання.



1.5 MiCOM P44x

Siemens пропонує лінійку SIPROTEC. Одним з найкращих варіантів є сучасне 5 покоління цієї лінійки приладів, яке перейняло позитивні сторони попереднього 4 покоління, а також розширило та покращило функціонал приладів. SIPROTEC — це модульна лінійка захисних реле з потужними засобами діагностики, масштабованими I/O, та складними алгоритмами. Воно вирізняється глибоким рівнем діагностики, широким спектром налаштувань і підтримкою великої автоматизованої інфраструктури.

У новій 5 серії реалізовані інноваційні підходи, такі як уніфікований робочий процес, безпека та захист інформації, а також моніторинг стабільності мережі (функція PMU). Сучасна архітектура системи надає користувачу повний контроль над розподільними пристроями. Надійна та потужна система зв'язку в поєднанні з гнучкими інженерними можливостями є основою управління системами з розподіленою децентралізованою структурою. Система зв'язку виступає центральним елементом архітектури, забезпечуючи гнучкість, безпеку та захист інформації в автоматизованих розподілених мережах. Новий DIGSI 5 надає користувачу індивідуальну підтримку, дозволяючи адаптувати робочий процес під конкретні потреби — від проектування до вибору пристрою, його введення в експлуатацію та тестування, охоплюючи весь життєвий цикл обладнання.



1.6 Лінійка пристроїв від Siemens – SIPROTEC

ABB RER615 — контролер, спеціально розроблений для керування та захисту реклоузерів. — рішення, яке поєднує функції захисту, автоматики, керування та комунікації, орієнтоване саме для роботи з реклоузерами. У нього підтримка IEC 61850, можливості дистанційного керування, журнал подій та осцилограми. RER615 підвищує надійність електричних мереж, забезпечуючи захист від перевантажень та розширені функції аналізу якості електроенергії. Пристрій ефективно працює в мережах із різними режимами нейтралі — ізольованою, компенсованою, заземленою через резистор або надійно заземленою.

Переваги:

- ⌚ Широкі функції виявлення, ізоляції та відновлення живлення на повітряних лініях.
- ⌚ Контроль якості електроенергії з реєстрацією провалів і стрибків напруги.

- ⌚ Адаптивні конфігурації, що спрощують налаштування та введення в роботу.
- ⌚ Зручний РК-дисплей із відображенням однолінійної схеми, локальним керуванням і безпечним доступом.
- ⌚ Веб-інтерфейс для параметризації та завантаження конфігурацій.
- ⌚ Функції кіберзахисту, зокрема ведення журналу аудиту.

Характеристики:

- ⌚ Гнучке керування трифазним реклоузером.
- ⌚ Можливість вільного програмування.
- ⌚ Вбудований моніторинг якості електроенергії та профілю навантаження.
- ⌚ Підтримка сучасних протоколів зв'язку: IEC 60870-5-101/104, DNP3, Modbus, IEC 61850 (GOOSE) для швидкодійного обміну та ізоляції аварій.



1.7 ABB RER615

Підсумовуючи, найоптимальнішим варіантом буде ABB RER615. Який поєднує в собі широкий функціонал, легкість монтажу, середню вартість та готові конфігурації. Воно має готові стандартні конфігурації для цих задач, що значно скорочує час інженерування, спрощує введення в експлуатацію та мінімізує ризики помилок. Крім того, RER615 поєднує захисні функції з інтегрованим моніторингом якості електроенергії (Power Quality) без необхідності встановлення додаткових модулів — те, що у конкурентів зазвичай реалізується через окреме обладнання. Простота налаштування через веб-інтерфейс, адаптивні

конфігурації та належність до екосистеми Relion забезпечують ефективність роботи на всіх етапах життєвого циклу пристрою. При цьому RER615 зберігає вигідне співвідношення ціни й функціональності, тоді як SIPROTEC, MiCOM та SEL у більшості випадків є дорожчими або складнішими у конфігурації, оскільки розраховані насамперед на підстанційні рішення.

Також важливим аспектом для таких реле є вологозахист та температура зовнішнього середовища. Адже релейні шафи для реклоузера зазвичай встановлюються на дворі. Тут також перевага за RER 615 який має вологозахист та захист від пилу в IP54, а температури від -25 до $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ (короткочасно -40 до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ не довше 16 годин). В конкурентів ці показники досягають IP45 – IP52 та температури від -25 до $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Але лише в SEL-651R є перевага по температурі, але він дорожчий за RER 615, тим більше таких високий температур у нас не має.

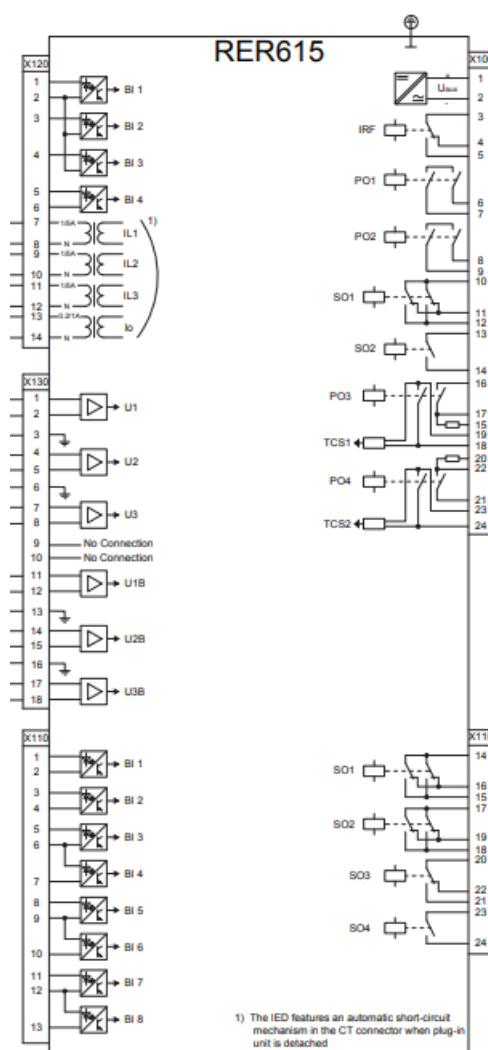


Рис. 1.8 Конфігурація D RER615

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Призначення лабораторного стенду

В експлуатації розподільчих мереж найчастіше виникають пошкодження саме на повітряних лініях, що пов'язано з дією атмосферних явищ, механічними навантаженнями та старінням ізоляції. Ці відмови можуть призводити до коротких замикань, втрати стійкості режиму або часткового знеструмлення споживачів. Для мінімізації наслідків аварійних ситуацій у сучасних енергосистемах все частіше використовуються автоматичні пристрої повторного вмикання — **реклоузери**, які забезпечують відновлення живлення після короткочасних пошкоджень без участі персоналу.

Робота реклоузера неможлива без високоточних систем релейного захисту та автоматичного керування, здатних швидко визначати місце несправності, здійснювати комутацію та контролювати стан лінії після вмикання. Для таких цілей застосовуються **ІЕП**, що поєднують у собі функції вимірювання, захисту, діагностики та комунікації.

У межах даної магістерської роботи створено **навчальний лабораторний стенд на основі ІЕП ABB RER615**, який виконує роль центрального елемента захисту й керування моделлю комірки 10 кВ. Пристрій RER615 призначений для захисту повітряних ліній у розподільчих мережах і підтримує функцію автоматичного повторного вмикання, що робить його оптимальним рішенням для відпрацювання алгоритмів роботи реклоузера. Стенд дає змогу змодельовати роботу релейного захисту при різних типах аварій, аналізувати час спрацювання, перевіряти логіку повторного вмикання та досліджувати взаємодію між функціями автоматики.

Головною метою створення стенду є формування практичних навичок роботи з цифровими системами релейного захисту та поглиблене вивчення особливостей функціонування реклоузерів у сучасних енергетичних мережах. Його використання дозволяє відтворювати поведінку елементів мережі в реальних

експлуатаційних умовах, перевіряти алгоритми дії пристроїв, проводити тести та симуляції роботи захистів та керування пристроєм.

2.2 Концепція створення лабораторного стенду

Ідея створення лабораторного стенда виникла з потреби у власній навчально-дослідній базі, яка б дозволяла перевіряти на практиці роботу сучасних пристроїв захисту без залучення діючого енергетичного обладнання. Такий підхід дає змогу проводити експерименти без ризику пошкодження реальних систем і водночас отримувати достовірні результати. Стенд також створено як платформа для подальших наукових розробок — випробування нових алгоритмів автоматики, схем комутації та цифрових технологій у релейному захисті.

2.3 Розробка каркасу лабораторного стенду. Етапи створення

Для того щоб створити стенд спершу треба його візуалізувати, знайти елементи, підготувати основу, схему. Немало важливо не просто з'єднати компоненти, а також їх спершу підготувати. Наприклад каркас. Сам каркас виготовлений зі сталі і слугував кришкою комірки 10 кВ. У зв'язку з заміною комірки на більш сучасну, з'явилася змога цей каркас використати в наукових цілях.

Використовуючи інформацію з відкритих джерел про можливість RER 615, були відібрані основні захисти, оцінений функціонал реле та прораховано які елементи саме потрібні на стенді. Після цього з'явився рисунок-концепт 2.1 самого стенду для орієнтації та оцінки об'єму робіт. На якому зображена приблизна к-ть потрібних елементів їх тип, розміщення. На ньому зображенні вказівні реле, реле РП-8 для симуляції роботи реклоузера, ABB RER 615, реле часу, двигун від електро-інструмента, клеми, сигнальні лампи, короб, блок живлення, автоматичні вимикачі та кнопки. Оскільки це лише початковий концепт для оцінки об'єму, то готовий виріб буде відрізнятися від задумки.

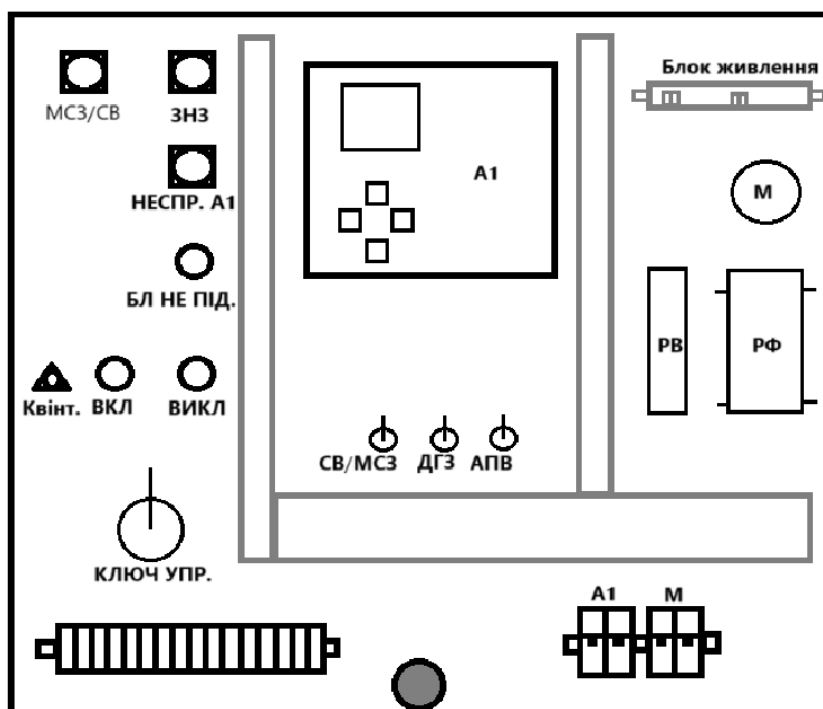


Рис. 2.1 Концепт стенду

Після того як каркас був демонтований з кімрки настала черга його підготувати до монтажу елементів. Підготовка включала в себе зачищення частин які піддались корозії, виріз форм для монтажу елементів та нанесення захисного шару акрилової фарби фірми Nowax DecorLux. Ця фарба чудового підходить для нанесення на металеву поверхню та має антикорозійний вплив. На схемі та стенді всі елементи позначають згідно зі стандартами IEC 81346, IEC 60445.

2.4 Вибір компонентів для лабораторного стенду

У складі лабораторного стенду використано допоміжне реле типу РП-8, яке працює в колах постійного струму з номінальною напругою 24 В. Це електромагнітне реле застосовується для реалізації допоміжних функцій комутації та індикації під час відтворення режимів роботи обладнання підстанції. РП-8 забезпечує надійну роботу кола керування, дозволяючи моделювати послідовність увімкнення, вимкнення та блокування елементів системи.

Основні технічні характеристики реле РП-8:

- ⌚ номінальна напруга живлення — 24 В (постійна напруга);
- ⌚ кількість контактів — 14 (7 нормально замкнуті, 7 нормально розімкнуті);
- ⌚ комутаційна потужність — до 40 ВА;

Для сигналізування про спрацювання захистів на стенді встановлено кілька вказівних реле типу РЕУ-11-21. Такі реле застосовуються для фіксації факту подачі струму спрацювання з подальшою зупинкою в робочому положенні до моменту ручного скидання. Завдяки цьому студент має змогу відслідковувати, який саме елемент захисту спрацював, що значно підвищує наочність експериментів.

Реле РЕУ-11-21 працює в колах постійного або змінного струму та призначене для струму спрацювання 0,05 А. Конструкція пристрою включає електромагнітну систему з фіксатором положення та механізмом повернення у вихідний стан при подачі імпульсу скидання.

Основні технічні характеристики реле РЕУ-11:

- ⊙ номінальний струм спрацювання — 0,05 А;
- ⊙ номінальна напруга живлення — до 250 В;
- ⊙ кількість контактів — 2 перекидні (1НЗ + 1НР);
- ⊙ час спрацювання — не більше 0,05 с;
- ⊙ споживана потужність — до 10 В·А;
- ⊙ механічна зносостійкість — не менше 10^5 циклів;
- ⊙ ступінь захисту корпусу — IP40;

Застосування реле РЕУ-11-21 на стенді дозволяє відтворити поведінку сигнальних ланцюгів, які використовуються у релейному захисті енергетичних об'єктів, зокрема для контролю спрацювань у схемах на базі ABB RER 615 та реклоузерів. На стенді представлено 3 вказівних реле КН1, КН2, КН3/

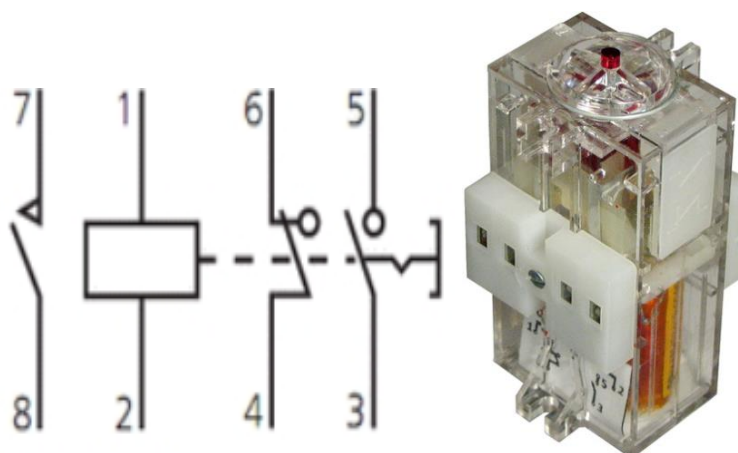


Рис. 2.4 Схема контактів та зовнішній вигляд РЕУ-11-21

Оскільки, номінальна напруга живлення всіх елементів панелі становить 24В, то відповідно елементи підібрані з номіналом такої ж напруги. Проте через складність отримати чи купити РЕУ-11-21 з номіналом напруги в 24В, було прийняте рішення поставити вкзівне реле роботи по струму. Але тут виникає інша проблема – струм який буде проходити через саме РЕУ буде занадто великим і є ризик його швидкого виходу із ладу. Тому було прийняте рішення – для живлення вказівних реле поставити опір на 300 Ом (R). Цього опору буде цілком достатньо щоб вберегти реле від поломок та швидкого зношення. Підбір опору відбувався по закону Ома. Враховуючи, що опір обмотки самого реле становить 90 Ом, то без встановлення резистору струм на обмотці буде :

$$I_{об} = U_m / R_{об} = 24 / 90 = 0.26A$$

де $I_{об}$ - Струм обмотки реле;

U_m - Напруга мережі;

$R_{об}$ - Опір обмотки реле.

Встановивши опір на 300 Ом, струм в обмотці буде 0,061А (враховано з власним опором самого реле). Цього буде цілком достатньо для спрацювання реле та забезпечить його довгий експлуатаційний термін.



Рис. 2.5 Резистор 300 Ом

Оскільки в 1 розділі вже було описано RER 615, то варто описати спосіб монтажу

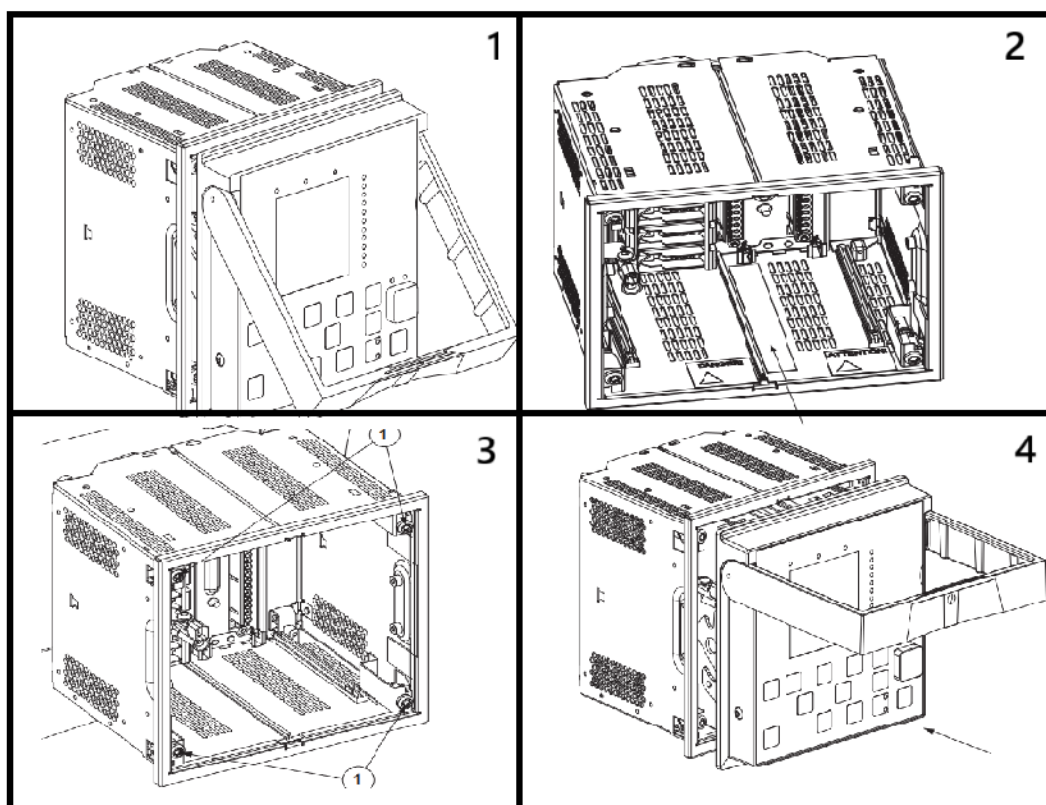


Рис. 2.6 Інструкція монтажу ABB RER 615

- 1- Підняти важіль.
- 2- Витягнути блок.
- 3- Закрутити болти для кріплення.
- 4- Вставити блок та опустити важіль .

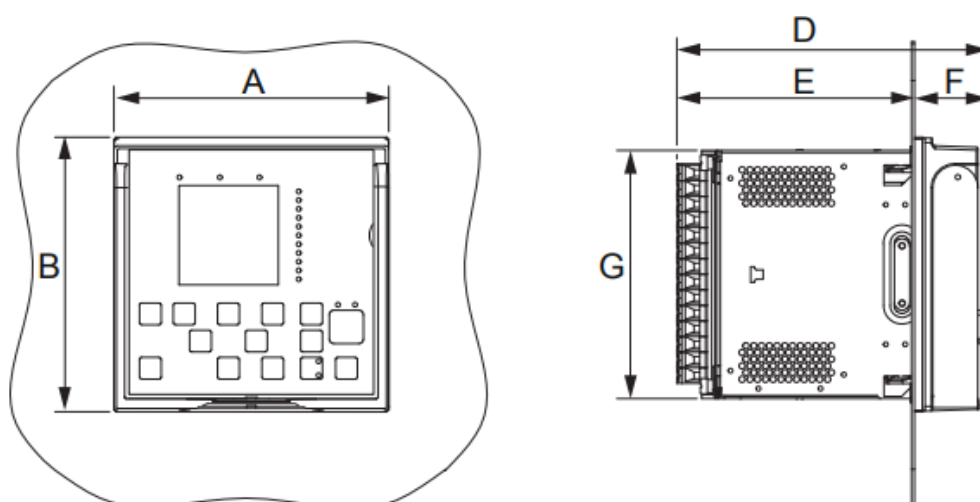


Рисунок 2.7 - Габаритні розміри приладу: A - 177 мм, B - 177 мм, C - 164 мм, D - 201 мм, E - 153 мм, F - 48 мм, G - 160 мм

Сигнальні лампи призначені для розуміння положення реклоузера (Вкл/Викл), в нашому випадку для кращого розуміння положення РП-8. Було обрано лампи від компанії АСКОУКРЕМ AD22-22DS 24V . Вони відзначаються хорошою надійністю, приємною ціною та мають хорошу яскравість, що допомагає краще зрозуміти стан положення. На стенді позначаються як HLR (червона-увімкнуто), HLR (зелена-вимкнено), HLY (жовта-вказівне реле не скинуто).

Короткі характеристик ламп :

- ⊙ Споживана потужність, Вт: 0.3
- ⊙ Номінальна робоча напруга U, В: AC/DC24
- ⊙ Тип індикатора: Світлодіод
- ⊙ Ресурс індикатора, год: 40000
- ⊙ Температура експлуатації, °С: -25...+55

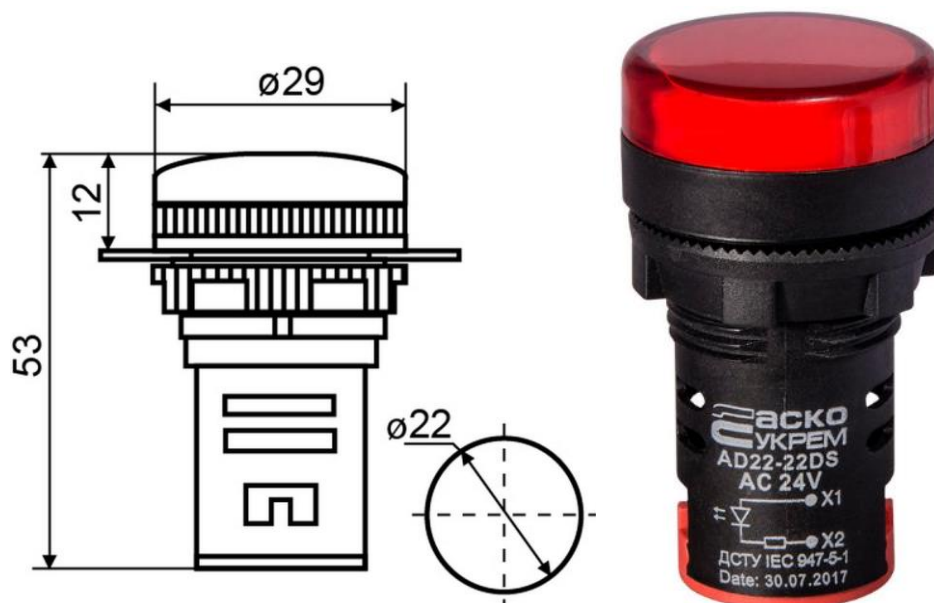


Рис. 2.8 Сигнальна лампа

Для керування станом реклоузера використовується ключ управління АРАТОР 4G10-52-U 63-840341-011. На схемі відображається як SA1 . Будучи компактним він має механізм повернення в вихідне положення. Це дає йому перевагу, керуюча напруга пуде подаватись 1 імпульсом, а не постійно, що в свою чергу дозволить прослужити елементам стенду та самому ключу довше. Ключ має 3 положення. Перше положення це 0 – тобто ключ в нейтральному стані і всі групи контактів відкриті. Друге положення 1. В цьому положенні контакти 1-2 та

3-4 закриті і через них проходить напруга. Третє положення контакти 5-6 та 7-8 закриті рис. 2.9.

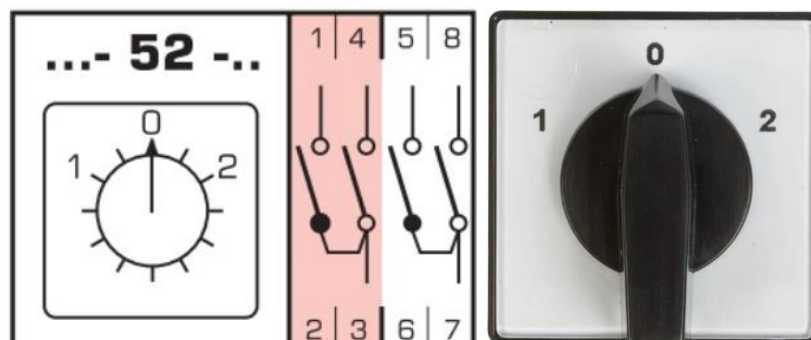


Рисунок 2.9 - Контактна схема та зовнішній вигляд ключа APATOR

Щоб мати змогу вводити та виводити певні захисти чи функції на стенді змонтовані накладки SX1, SX2, SX3. Обмеження функціоналу за допомогою накладок потрібне наприклад коли на лінії проводяться ремонтні роботи, а блокування АПВ необхідне щоб убезпечити ремонтну бригаду від ураженням струмом. Або наприклад при перевірці і тестуванні реклоузера. Накладки зможуть наочно показати студентам як вони взаємодіють з реле. Використані в стенді XB2-BD21 наладки є трьохпозиційними з нормально відкритим контактом, який при перемиканні положення накладки замикається та має такі характеристики :

- Номінальний робочий струм I_e , А: AC5/DC1
- Номінальна робоча напруга U_e , В: AC230/DC110
- Зносостійкість електрична, циклів: 100000
- Зносостійкість механічна, циклів: 1000000
- Ступінь захисту: IP 40

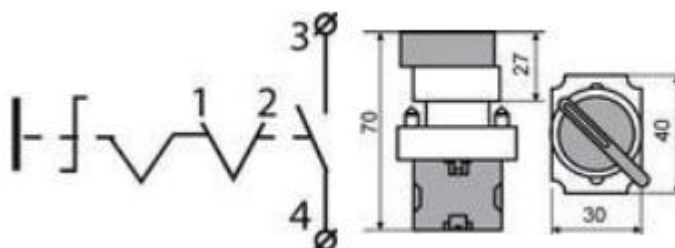


Рисунок 2.10 - Схема та розміри накладки трьохпозиційної

Разом з накладками використовується і кнопка SB1 для подачі короткочасного сигналу на дискретний вхід ВІ4. Це дозволяє скидати світлодіодну індикацію на приладі.

Щоб мати змогу подавати тестовий струм, реалізувати внутрішні з'єднання та живити саму панель від автоматичних вимикачів – використовуються клеми 2 компаній : Klemsan та Phoneix Contact. Klemsan для подачі живлення на схему та з'єднань, а Phoneix Contact для подачі тестових струму та напруги відповідно.

Нижче наведені короткі характеристики :

Klemsan (VT-4):

- Номінальна напруга: до 600...750 В.
- Номінальний струм: $\approx 30...32$ А .
- Допустимий поперечний переріз жил: від 0,5 мм² до 4 мм².

Phoneix Contact (UK-6-T):

- Номінальна напруга: 500 V.
- Номінальний струм: 41 А (максимальне навантаження залежить від перерізу жили; для 10 мм² — вищий піковий допустимий струм).

Клеми від Klemsan характеризуються хорошою надійністю та якістю, також мають досить приємну ціну. В свою чергу UK-6-T є одними з найкращих клем, мають хороший контакт, зносостійкість та якість матеріалу. Також в них є можливість розривати чи замикати контакт для безпеки.

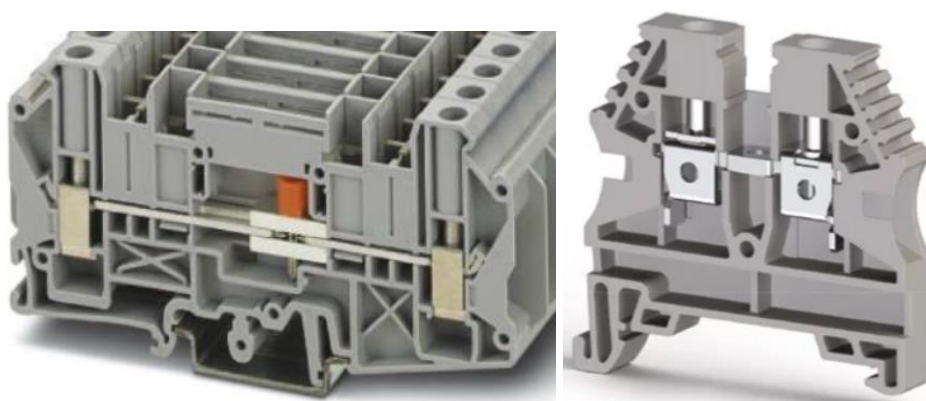


Рисунок 2.11 - Клеми UK-6-T від Phoneix Contact та VT-4 від Klemsan

В реклоузерах для максимально швидкого вимкнення або увімкнення використовується механізм з двигуном та пружинами. Це забезпечує швидке знеструмлення, а також дозволяє виконувати АПВ. Для симуляції такого механізму, було використано двигун (М) з електричної пили та реле часу (КТ),

щоб після кожної операції на ввімкнення чи вимкнення двигун симулював підзаведення пружини, а реле часу давало час на двигунові, та вимикало його після завершення.

Двигун GRS 550VC 25V який використовується має компактний розмір, зручно монтується.

Має такі характеристики :

- $U_{\text{ном}} = 25 \text{ В};$

- $I_{\text{ном}} = 2.4 \text{ А};$

- $P = 60 \text{ Вт};$

Через маленьке споживання, розміри, та простоту підключення та номінальну напругу він був обраний для монтажу в панель.



Рис. 2.12 Двигун GRS 550VC

Для контролю часу роботи двигуна встановлене реле часу РЕВ114 (КТ) від Novatek. Пристрій належить до універсальних електронних реле часу, призначених для формування затримок увімкнення або вимкнення електричних кіл у діапазоні від часток секунди до кількох хвилин, залежно від конфігурації.

Реле РЕВ-114 забезпечує стабільну роботу навіть при незначних коливаннях напруги живлення, що важливо в умовах навчального стенду, де можуть відбуватися часті комутаційні процеси. Воно має компактне виконання для монтажу на DIN-рейку, що спрощує його інтеграцію до панелі.

- Напруга живлення: 24 В DC.
- Діапазон уставок часу: від 0,1 с до 10 днів.
- Струм комутації: до 6 А.



Рисунок 2.13 - РЕВ 114

За живлення всіх елементів відповідає блок Mean Well IP20 LRS-24-200 та автоматичні вимикачі. використовується в лабораторному стенді як основне джерело постійної напруги для живлення релейно-керуючих елементів, індикаторів, допоміжних кіл та електродвигуна. Це імпульсний блок живлення відкритого типу, який характеризується високою ефективністю, стабільністю вихідної напруги та компактними розмірами, що робить його оптимальним рішенням для використання в навчальних стендах та системах автоматики.

Блок забезпечує стабільну подачу напруги 24 В DC з максимальною потужністю 200 Вт, що дозволяє одночасно жити кілька елементів системи без втрати стабільності параметрів. Mean Well LRS-24-200 має вбудований захист від короткого замикання, перевантаження, перенапруги та перегрівання, що гарантує надійну і безпечну роботу лабораторного комплексу навіть у разі нештатних ситуацій. Його характеристики наведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 Характеристики Mean Well LRS-24-200.

Мінімальна вхідна напруга	90 В
Максимальна вхідна напруга	264 В
Вихідний струм, не більше	8.8 А
Вихідна напруга	24 В
Мінімальна вихідна напруга	21.6 В
Вихідна потужність	211. Вт



Рисунок 2.14 - Блок живлення Mean Well LRS-24-200.

Вся схема і відповідно блок живлення жививляться від автоматичного вимикача Schneider Electric на 4 Ампера та який має характеристику С. Такі параметри були обрані, для безпечної та правильної роботи схеми. Автоматичний вимикач захистить від короткого замикання, а також не спрацює при пусковому тоці двигуна. Для миттєвого спрацювання потрібно щоб струм К.З. перевищував номінальний в 5 разів, тобто 20А. А при перевищенні номінального струму автомата в 4А, потрібен час 1,5 секунди – тоді спрацює тепловий роз'єднювач. Пусковий струм двигуна не зможе досягнути 20А або протриматись 1,5 секунди. Тому такі характеристики автоматичного вимикача чудово вписуються.



Рисунок 2.15 - Автоматичний вимикач Schneider Electric C4

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Опис схеми та роботи мікропроцесорного пристрою

Для коректної та ефективної роботи пристроїв релейного захисту необхідно розробити схему, підключити елементи та правильно запрограмувати саме реле. Від цього залежить надійність та ефективність розподільних електричних мереж класу напруги 10 кВ є критично важливими для забезпечення безперебійного електропостачання споживачів.

Специфіка експлуатації реклоузерів полягає в їх автономній роботі на віддалених ділянках лінії, де критично важливою є коректна робота автоматики повторного ввімкнення АПВ та селективність відключення пошкодженої ділянки. Одним з найпоширеніших видів аварій є аварії на лініях 10-35кВ, а саме однофазне коротке замикання, але часто буває так, що воно короткочасне, гілка зачепила провід чи через погодні умови. Тому для коректного живлення споживачів і швидкого увімкнення реклоузера який був вимкнений через аварію в таких мікропроцесорних пристроях окрім базових функцій захисту є й функція АПВ.

Щоб прилад працював ефективно та довго його потрібно правильно налаштувати та вчасно обслуговувати (огляд, випробування, очищення від пилу та за потреби ремонт)

Проте, випробування безпосередньо на діючому силовому обладнанні має низку обмежень. По-перше, багаторазові цикли ввімкнення/вимкнення для перевірки логіки АПВ призводять до зношування механічного ресурсу дороговартісного вакуумного вимикача. По-друге, створення реальних коротких замикань у діючій мережі для перевірки реакції захисту є неприпустимим. Тому перевірка алгоритмів виконується шляхом подачі вторинних величин струму та напруги, що імітують аварійний режим. Саме для таких цілей у даній роботі використовується імітаційний стенд.

Для реалізації поставлених завдань розроблено принципову схему стенду, яка імітує повний цикл роботи реклоузера. Ключовим технічним рішенням є заміна силового вакуумного вимикача на його електромеханічний аналог — проміжне реле РП-8. Часові характеристики та логіка комутації контактів даного

реле дозволяють коректно відтворити процеси роботи приводу вимикача, які фіксуються дискретними входами (VI) мікропроцесорного пристрою.

Оперативна робота зі стендом передбачає використання органів керування та сигналізації, які дублюють реальні дії оперативного персоналу:

1. Керування режимами роботи: У схемі передбачено накладки управління, під'єднані до дискретних входів термінала, що дозволяє оперативно змінювати логіку захисту без перепрограмування пристрою:

- о Ключ блокування/розблокування АПВ та увімкнення дозволяє змодельовати режим заборони повторного ввімкнення та ввімкнення персоналом (наприклад, при проведенні ремонтних робіт на лінії).
- о Ключ введення струмових захистів (МСЗ, СВ) дає змогу дослідити роботу пристрою при появі струмів які перевищують задані уставки в реле.
- о Ключ введення напругових захистів (перенапруга, понижена напруга).
- о Ключ симуляції несправності пристрою живлення, при введенні якого сигналізація вказує на проблеми з приладом живлення.

2. Симуляція комутацій: Взаємодія між терміналом RER615 та реле РП-8 організована через силові вихідні контакти (PO). При фіксації аварійного режиму термінал подає команду на відключення, розриваючи коло живлення котушки РП-8.

3. Візуалізація та сигналізація: Для оцінки роботи алгоритмів стенд обладнано світловою індикацією положення вимикача («Ввімкнено»/«Вимкнено»). Додатково, для фіксації фактів спрацювання захисту та успішності роботи АПВ, застосовано електромеханічні вказівні реле (блінкери), підключені до сигнальних виходів (SO). Це дозволяє наочно зафіксувати факт аварійного відключення, що є важливим елементом аналізу роботи РЗА.

Панель та її елементи дозволяють наочно демонструвати роботу релейної шафи реклоузера, симулювати режими роботи реле, проводити тестування та випробування.

В даному розділі розглянемо роботу елементів схеми, їх з'єднання, логіку роботи реле, а також проведемо кілька дослідів для наочного демонстрування роботи панелі.

3.2 Електрична схема панелі

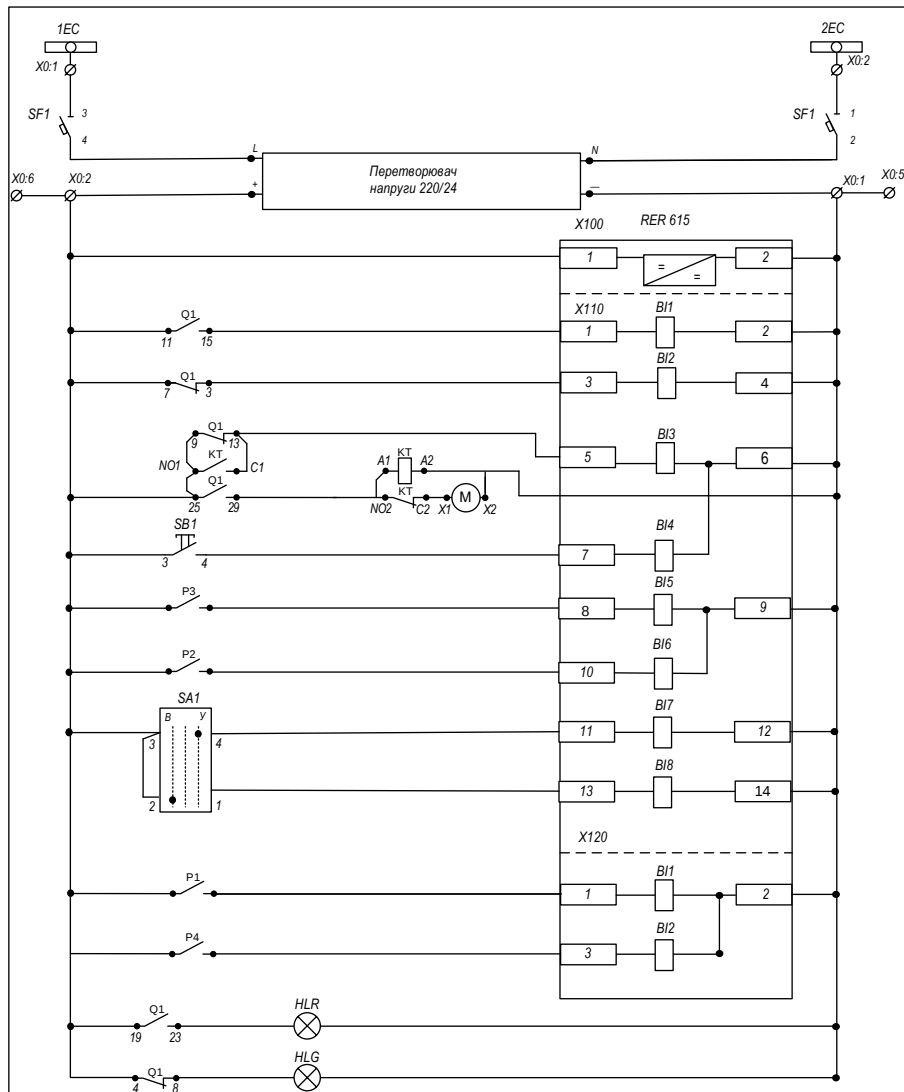
Схема містить ряд умовних позначень та накреслена згідно з 2.710 (ДСТУ) та ІЕС 60617. Відповідно до цих стандартів :

Умовні позачення на схемі :

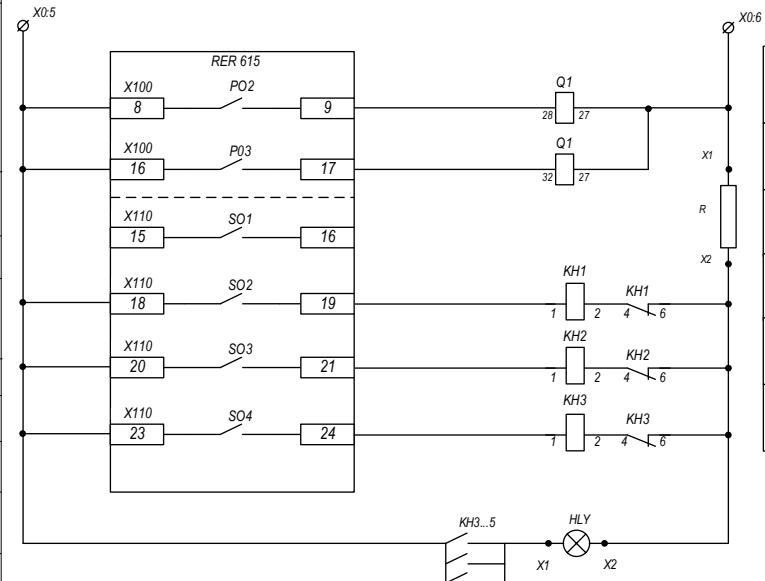
1. SF – автоматичний вимикач;
2. ЕС – шинки управління;
3. Q – вимикач;
4. SB – кнопка;
5. КТ – реле часу;
6. М – електричний двигун;
7. SA – ключ управління;
8. Р – накладка (позиційний перемикач);
9. HL (R/G/Y) – лампи (червона/зелена/жовта);
10. КН – вказівне реле (блінкер);
11. X0:1 – клемма;
12. R – резистор (опір);

В мікропроцесорному реле :

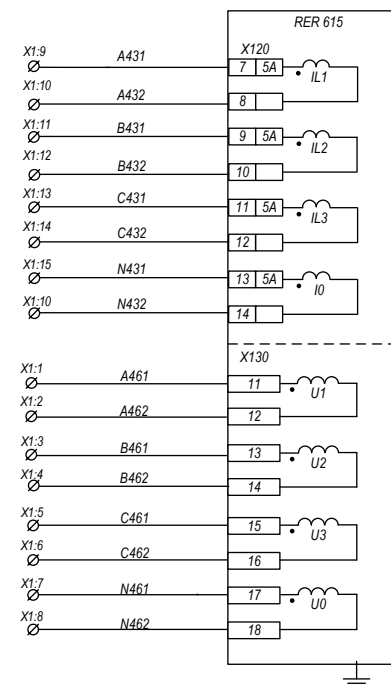
1. ВІ – дискретний вхід або вихід;
2. X100 – відповідна плата реле;
3. SO – сигнальні контакти;
4. РО – силові контакти;



Шинки управління
Автомат кіл захисту
Кола живлення пристрою
Реклоузер включений
Реклоузер відключений
Реклоузер готовий
Кола підзаводки
Квіттування індикації
Блокування увімкнення та АПВ
Блокування струмових захистів
Команда включення
Команда відключення
Блокування напружових захистів
Несправність пристрою живлення
Лампа сигнальна Вимикач включений
Лампа сигнальна вимикач відключений



Реле повторювач команди „Увімкнути“
Реле повторювач команди „Вимкнути“
Робота АПВ
МСЗ/СВ
ЗНЗ



Кола змінної струму захисту
Кола змінної напруги захисту

3.3 Живлення мікропроцесорного пристрою

Реле RER615 має 2 спеціальні входи для живлення, вони знаходяться на платі X100, на перший вхід (ВХІД 1) подається +, а на ВХІД 2 - . Напруга живлення реле становить 24-60 В та є постійною. Подається через клеми X0:2 для + та X0:1 для - .

Для забезпечення такої напруги встановлений перетворювач 220-24В Mean Well LRS-24-200 який в свою чергу живиться від автоматичного вимикача. 4 Контакт автомату підключений до клеми L приладу живлення, а 2 до N,

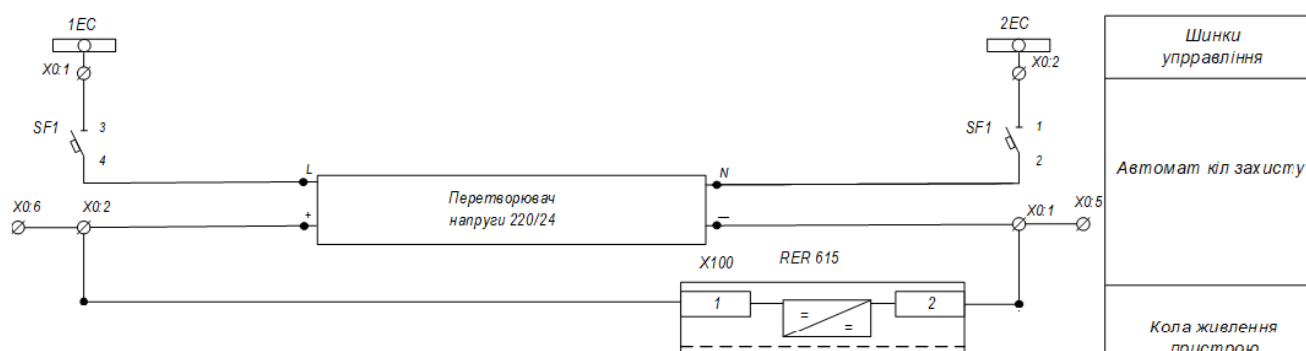


Рисунок 3.1 - Схема живлення мікропроцесорного реле

3.4 Положення вимикача та його готовність

Для коректної роботи логіки автоматики та захистів реле RER615 повинно постійно отримувати актуальну інформацію про стан силового вимикача.

Реалізація цієї функції здійснюється через підключення контактів вимикача до дискретних входів (Binary Inputs) реле на платі X110. Зазвичай використовується "подвійна" індикація: один вхід контролює нормально розімкнений контакт, а інший — нормально замкнений. Це дозволяє фіксувати положення "Увімкнено" або "Вимкнено". При положенні "Вимкнено", тобто РП-8 вимкнене, нормально замкнутий контакт 7-3 на РП-8 подає сигнал до дискретного входу BI2:3. Вхід BI2:3 спеціально запрограмований так, що б при подачі на нього сигналу RER615 "розумів", що вимикач вимкнено. При положенні "Увімкнено" (РП-8 включене) контакти РП-8 7-3 розімкнуті, а контакти 11-15 замикаються тим самим подаючи сигнал на BI1:1 .

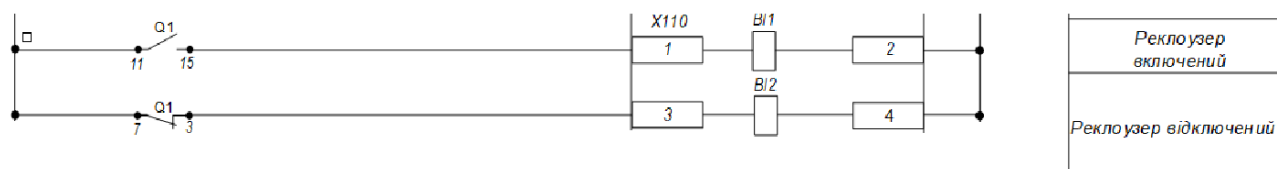


Рис. 3.2 Логіка фіксування мікропроцесорним реле положення РП-8

Також для того щоб реле “розуміло” чи реклоузер готовий до увімкнення, тобто двигун зтягнув пружину і вона може швидко розімкнути контакт, на дискретний вхід ВІЗ:5 повинен подаватися сигнал. Ось як це реалізовано на схемі:

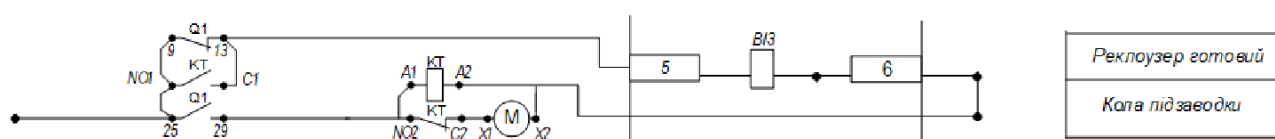


Рис. 3.3 Схема кіл підзаводу пружини та готовності вимикача (Стан контактів коли вимикач вимкнено)

- РП-8 (Q1) коли вмикається замикає контакти 25-29 на реле часу (КТ) подається живлення. Контакти 9-13 в цей момент розмикаються щоб не було хибної подачі про те що, вимикач готовий.
- Реле часу 5 секунд подає живлення через контакти NO2, C2 на двигун (М) “пружинна зтягується”
- Після 5 секунд реле часу розмикає контакти NO2 та C2 і замикає контакти NO1 – C1
- Контакти NO1 – C1 подають сигнал на ВІЗ:5
- ВІЗ:5 сигналізує реле про те що пружина підзаведена та реклоузер готовий до наступної операції
- Після вимкнення РП-8, контакти повертаються в вихідне положення.

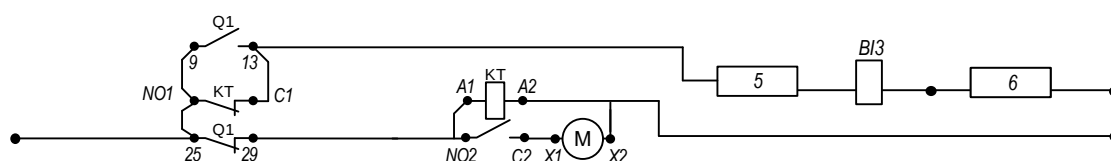


Рис. 3.4 Стан контактів при увімкненому вимикачі

3.5 Дискретні входи

Позначаються на схемі як VI (Binary inputs) і призначенні для забезпечення фізичної взаємодії мікропроцесорного приладу з комутаційним обладнанням (реклоузером/вимикачем) та зовнішніми системами керування (ключі управління, перемикачі тощо).

Дискретні входи які призначенні для зміну режиму роботи реле в даному стенді запрограмовані на блокування напругових захистів (P1) ,блокування струмових захистів (P2) блокування увімкнення від ключа та АПВ (P3) та симуляція несправності живлення (P4).

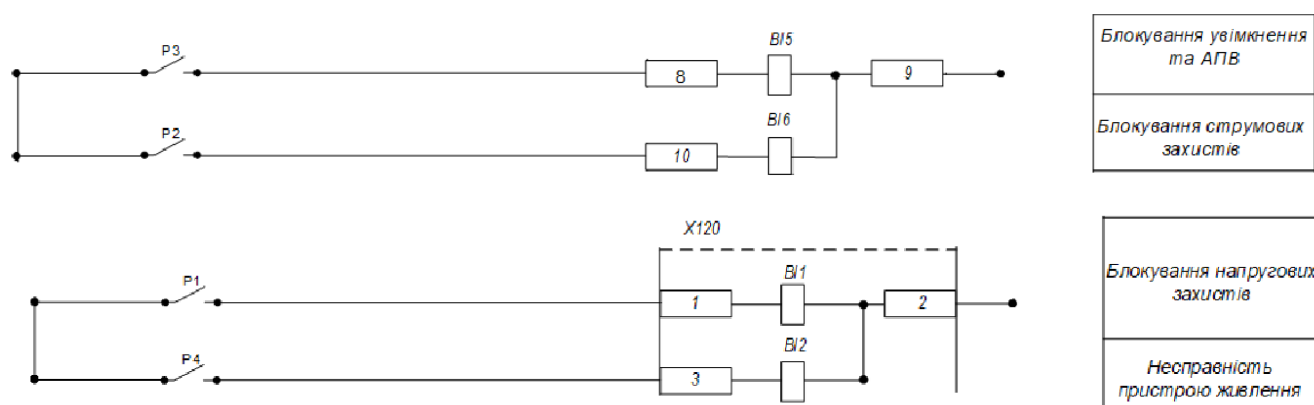


Рис. 3.5 Дискретні входи для зміну режиму роботи реле

Для керування реклоузером був використаний ключ управління SA1. Він подає сигнал на VI7:11 четвертим контактом для увімкнення або 1 контактом на VI8:13 для вимкнення.

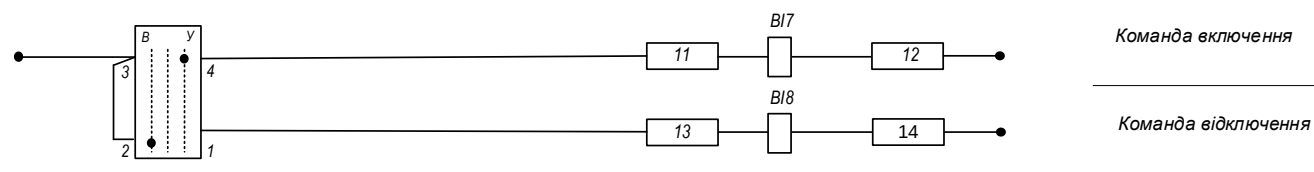


Рис. 3.6 Ключ управління для увімкнення РП-8

Також дискретний вхід VI4:7 який ми можемо керувати кнопкою SB1, призначений для скидання світлодіодної індикації для самого мікропроцесорного реле. Після спрацювання якого небусть захисту світлодіод загоряється та не згасне до скидання індикації. Це потрібно, щоб розуміти який захист спрацював.

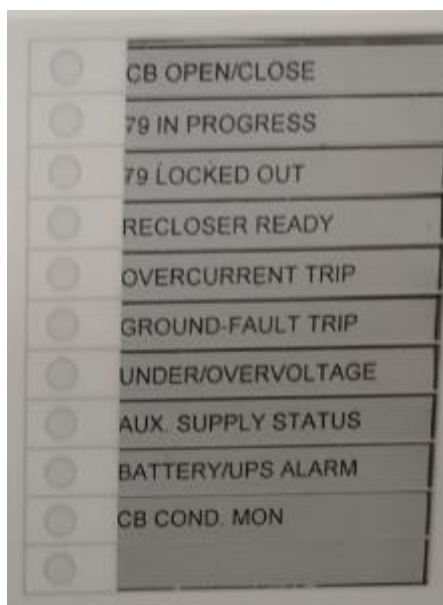


Рис. 3.7 Світлодіоди на реле



Рис. 3.8 Кнопка квінтування

3.6 Дискретні виходи (силові контакти)

Дискретні виходи для безпосереднього керування вимикачем (силові контакти) позначаються як РО (Power outputs). Система дискретних виходів (Binary Outputs) забезпечує взаємодію мікропроцесорного терміналу з виконавчими механізмами комутаційного апарату та колами сигналізації. Фізично ці виходи реалізовані на базі електромагнітних реле, що забезпечують повну гальванічну розв'язку внутрішніх логічних кіл пристрою від зовнішніх кіл оперативного струму. Використовуються для управління безпосередньо самим реклоузером (увімкнення та вимкнення). Номінал напруги складає 24-60В, номінальний струм 8А. При подачі 15А не довше 3 сек. та 30А не довше 0.5 сек. Силовий контакт РО2:8-9 при команді “увімкнути” подає живлення на 27-28 контакт Q1 тим самим вмикаючи його. Для вимкнення використали 32-27

контакт Q1 та дискретний вихід PO3:16-17 на платі X100.

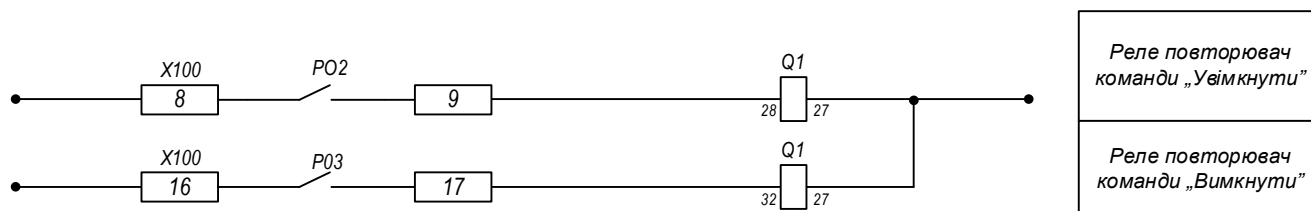


Рис. 3.9 Силові контакти

3.7 Дискретні виходи (сигнальні контакти)

Позначаються як SO і використовуються з сигнальними реле для сигналізації панелі. Призначенні на напругу 24-60 В та номінальний струм до 5А. 10А до 3 сек. та 15А до 0.5 сек. Оскільки для живлення сигнальних реле не потрібна така потужність як для увімкнення реклоузера, то і характеристики контактів значно поступаються. На панелі представлено 3 вказівних реле які позначаються як :

- КН1: Аварійне вимкнення (при роботі будь якого захисту).
- КН2: Несправність пристрою живлення.
- КН3: Робота АПВ.

Як було зазначено вище, ці реле встановлюються з опором 300Ом для забезпечення їх довговічності та надійності. А ще також для надійності вони змонтовані на “саморозрив”. Тобто при подачі живлення на котушку КН, контакт 4-6 розмикається тим самим перериваючи живлення реле. Реле спрацює та зафіксується в робочому положенні, але живлення не буде. Також через контакти сигнальних реле живиться лама HLY, яка буде сигналізувати про те що КН не повернутий до початкового стану (блінкер не піднято).

на реле окрім останньої цифри. Тобто адреса на ПК буде 268.192.00.26, на реле 268.192.00.27.

Потім підключивши кабель ethernet до ПК та на передній порт реле (бо ми вибирали front port), заходимо в програму РСМ600. Далі таким чином створюємо рівень напруги . приєднання. І вибираємо пристрій RER 615. Повинна бути така структура : підстанція > рівень напруги > приєднання > пристрій RER 615.

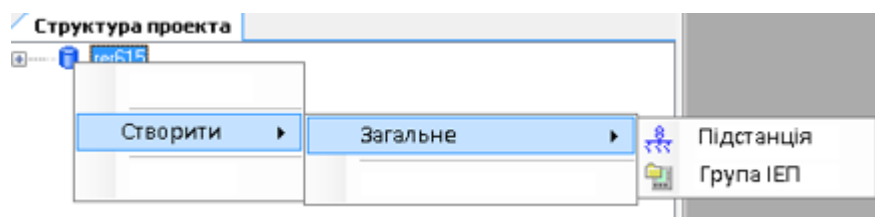


Рис. 3.11 Створення структури проекту

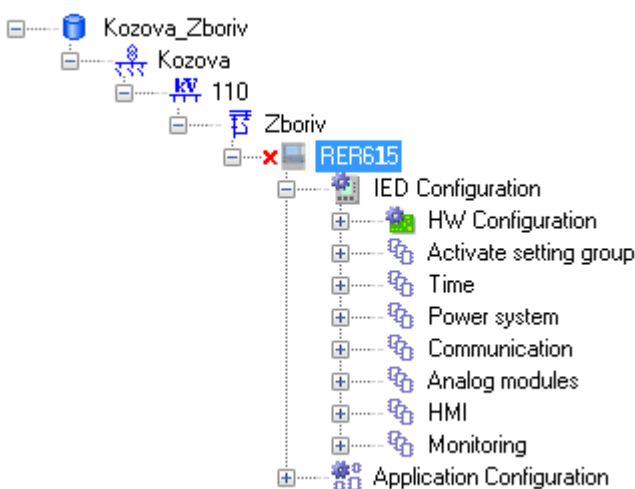


Рис. 3.12 Повне дерево проекту

Нажимаємо пкм (правою кнопкою миші) по обраному реле та обираємо в вікні Порт для зв'язку > front port. Біля фото пристрою має з'явитися зелена галочка замість червоного хрестика. Якщо реле не підключилося, то варто витягнути кабель ethernet та повторно його підключити.

Після підключення знову натискаємо правою кнопкою по іконці реле та обираємо читання з ІЕП. Це дозволить завантажити з реле в ПК та в РСМ600 його конфігурацію і стандартні налаштування які були запрограмовані виробником та змінити їх.

Отже, для налаштування конфігурації логіки та конфігурації уставок. Обираємо конфігурацію логіки в вікні яке відкривається в вікні RER615. З права з'явиться вікно для налаштування логіки. Таким чином відкриваємо і конфігурацію уставок.

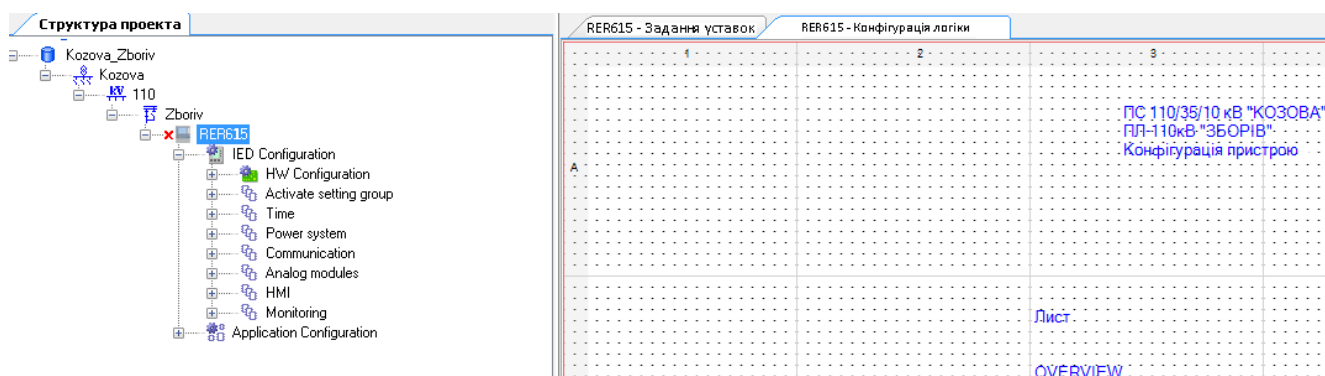


Рис. 3.13 Вибір налаштування конфігурації логіки

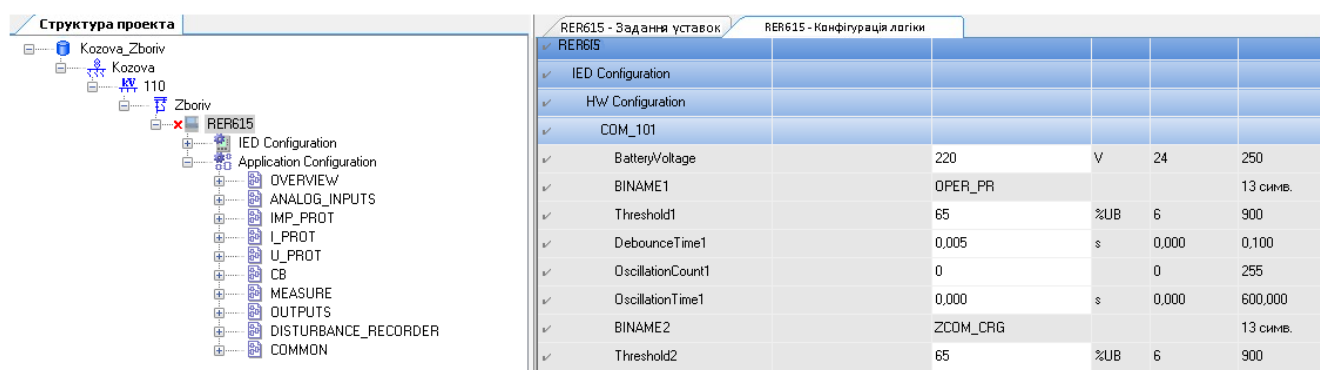


Рис. 3.14 Вибір налаштування конфігурації уставок

3.9 Розгляд та налаштування конфігурації блоків. Загальні блоки.

В РСМ600 є кілька видів класичних для мікропроцесорних приладів логічних блоків, вони мають своє призначення. Це OR, AND, NOT.



Рис. 3.15 Логічні блоки

А також функціональні блоки які формують команди на включення, відключення та передають команди на дискретні виходи. Розглянемо основні функції, типи захисту та блоки які за них відповідають.

1. Блок OR – логічне АБО. Його вихідний сигнал стає активним логічна 1, якщо хоча б один із вхідних сигналів є активним. Якщо ніяких вхідний сигнал не активний, то вихідний сигнал буде також неактивним або логічний 0. В нашій конфігурації використовується для “збирання” загальних сигналів на відключення. Наприклад, є захист від підвищеної напруги:

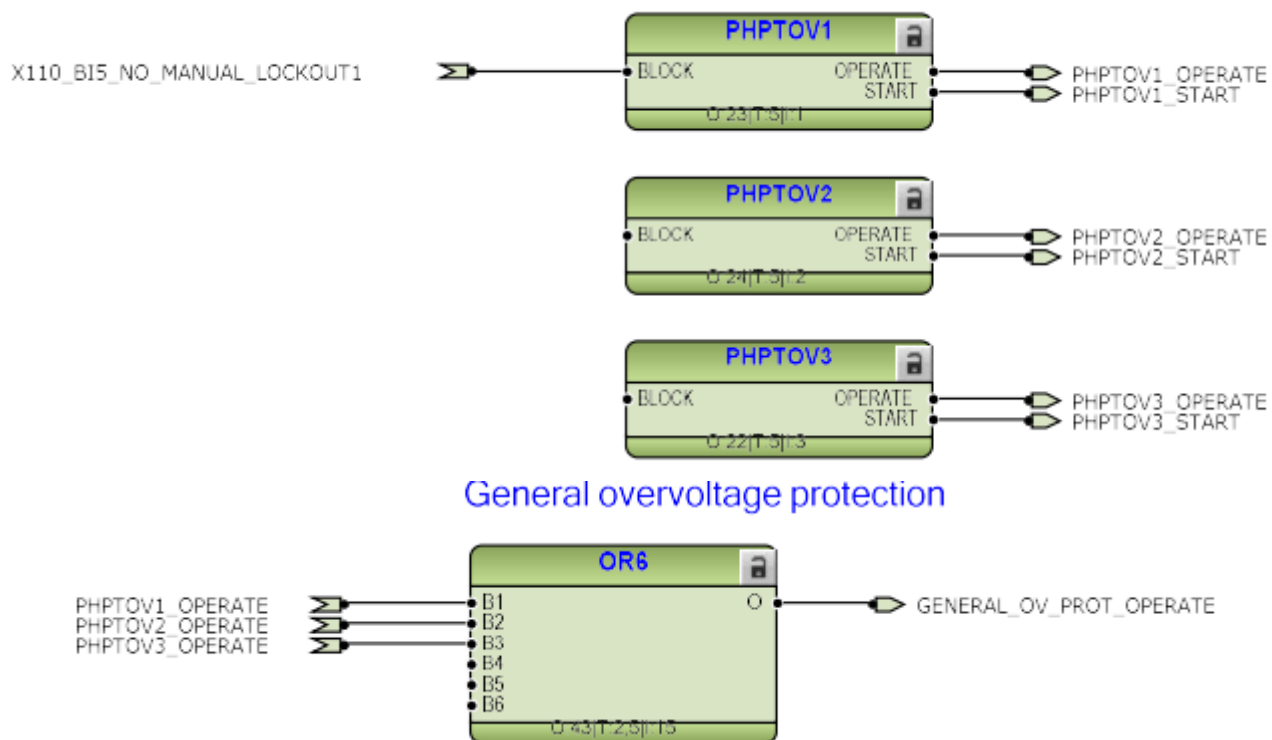


Рис. 3.16 Принцип роботи блоку OR

Блоки PHPTOV1, PHPTOV2, PHPTOV3 (в перекладі - Three-phase overvoltage protection) це блоки захисту від підвищеної напруги 3-х ступеней захисту. При подачі напруги яка перевищує уставку, ці блоки генерують сигнали PHPTOV (1,2,3)_OPERATE які збираються в блоці OR6 і створюють головний сигнал відключення від перевищення напруги GENERAL_OV_PROT_OPERATE. Сигнали від захистів зазвичай формують 1 загальний сигнал на відключення. Це робиться для зручності та компактності, щоб не протягувати кілька сформованих сигналів (і це тільки від одного захисту) на блок відключення, а протягнути 1 загальний сигнал від 1 типу захисту.

2. Блок AND – логічне і. При умові, що всі вхідні сигнали активні, вихідний сигнал також буде активним і стане логічною 1. Але якщо хоча б один вхідний сигнал неактивний, то вихідний теж буде неактивний. Застосовують наприклад

для формування сигналу “дозвіл на увімкнення”. Тобто є така функція як АПВ яку ми розглядали вище. Щоб АПВ спрацювало потрібно щоб всі умови на блоці AND були задоволенні. І видавали логічну 1



Рис. 3.17 Принцип роботи блоку AND

MVGAPC1_RECLOSER_READY – дасть логічну 1, якщо на дискретний вхід BI3 прийде сигнал через контакт Q1 9-13, що пружина під заведена і він готовий до увімкнення. Наступна умова це те що реклоузер вимкнений. Сигнал про вимкнений реклоузер надійде в дискретний вхід BI2 через контакт Q1 7-3, коли він буде замкнутий.

3. Логічний блок NOT – логічне ні, інверсія. Його принцип роботи полягає в зміні вхідного сигналу на протилежний. При подачі логічної одиниці на вхід, на виході завжди отримуватимемо логічний 0. Це застосовується в зміні логіки роботи, використовується ну наприклад коли є нормально розімкнутий контакт (через який сигнал не пройде і якщо це буде блок OR, то він видасть 0) а потрібно щоб видав 1, тому і використовують блок NOT.

3.10 Логічні блоки захисту

Стенд реалізовує основні захисти які використовуються в реальних умовах. Для симуляції цих захистів та подачі тестових значень встановлені клеми для випробувань, задані уставки та налаштовані і підключенні логічні блоки захистів. Ось основні блоки захисту :

- RNIPTOC (Three-phase non-directional overcurrent protection, instantaneous stage) – Трифазний неспрямований захист від перевантаження по струму, миттєва ступінь. Струмова відсічка ненаправлена (СВ).

- DPHNPDOC (Three-phase directional overcurrent protection, high stage) – Трифазний спрямований захист від перевантаження по струму, висока ступінь. Струмова відсічка, направлена (СВ).
- FDPHLPDOC (Three-phase directional overcurrent protection, low stage) – Трифазний спрямований захист від перевантаження по струму, низька ступінь (МСЗ).
- NSPTOC (Negative-sequence overcurrent protection) – Захист від струму зворотної послідовності (МСЗ₀)
- EFIPTOC (Non-directional earth-fault protection, instantaneous stage) – Захист від замикань на землю ненаправлене (ЗНЗ).
- PHPTOV (Three-phase overvoltage protection) – Захист від підвищеної напруги.
- PHPTUV (Three-phase undervoltage protection) – Захист від пониженої напруги.
- PDNSPTOC (phase discontinuity protection) – Захист від обриву фази.

Логічний блок захисту РНІРТОС призначений для реалізації трифазного ненаправленого максимального струмового захисту (МСЗ) та струмової відсічки (СВ). Він є основним видом захисту від міжфазних коротких замикань (КЗ) у розподільчих мережах. Його завданням є миттєве спрацювання при дуже великих струмах. Функціонування блоку базується на вимірюванні значень струмів. Блок безперервно порівнює виміряні значення з уставкою спрацювання.

Логіка роботи складається з наступних етапів:

1. Вимірювання: Блок отримує дискретні значення струмів від аналого-цифрового перетворювача.
2. Порівняння (Пуск): Якщо струм у будь-якій з фаз перевищує встановлене порогове значення то блок миттєво активує вихід START.
3. Витримка часу: Після активації пуску запускається таймер. Залежно від налаштувань, блок може працювати за двома типами характеристик:

- о Незалежна витримка часу: Час спрацювання є фіксованим і не залежить від величини струму. (Використовується для СВ).
- о Залежна витримка часу): Час спрацювання обернено пропорційний величині струму (чим більший струм, тим швидше відключення).

4. **Спрацювання (Відключення):** Якщо умова перевищення струму зберігається протягом заданого часу (Operating time), активується вихід OPERATE. Цей сигнал подається на логіку відключення вимикача (TRPPTRC).

Покроково це виглядає так :

- 1) Струм тестовий подається на X120 плату клеми 7-8, 9-10 або 11-12 (або на всі 3 фази подавати тестовий струм) та перевищив уставку реле $I_{\text{тест}} > I_{\text{уст}}$

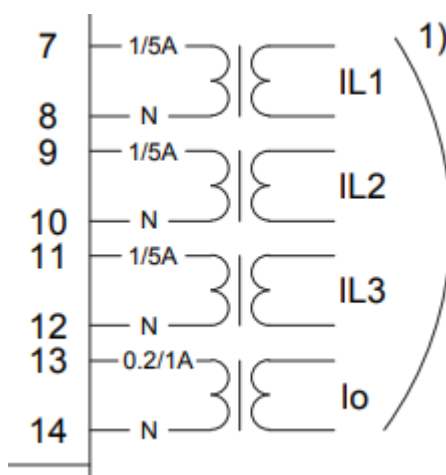
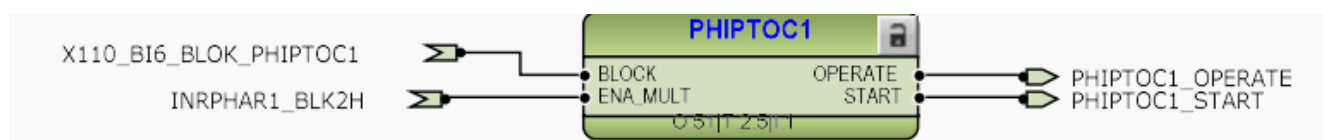


Рис.3.18 Струмові кола реле RER615

- 2) АЦП перетворює цей струм в сигнал.
- 3) Оскільки уставка лише по струму перевищена (Струм тече в правильному напрямку, $\ggg I_0$ не спрацює, бо клеми 7-8, а не 13-14), то активується лише блок PHIPTOC1.



- 4) Він видасть 2 сигнали (PHIPTOC1_START та PHIPTOC1_OPERATE), при умові якщо ми не заблокуємо його накладкою P2, яка подасть своїми контактами напругу на дискретний вхід ВІ6, який і заблокує блок PHIPTOC і він не спрацює.
- 5) Сигнал PHIPTOC1_START призначений для, подачі сигналу на блінкер – аварійне вимкнення та таймеру. Якщо таймер відрахує весь час – 39мс, а сигнал PHIPTOC1_START не зникне, тобто аварійна ситуація не зникла, то таймер подасть сигнал PHIPTOC1_OPERATE – вимкнути реклоузер.

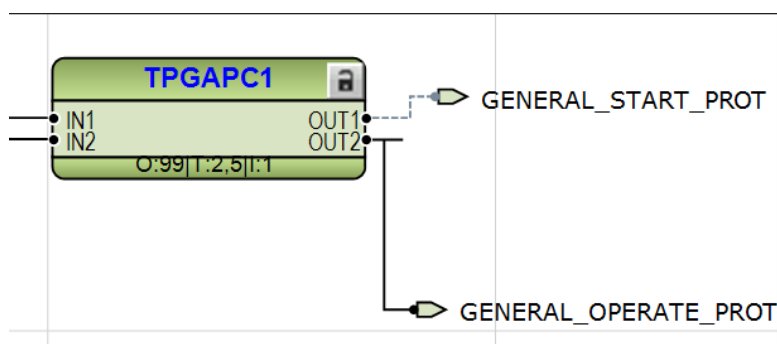


Рис.3.20 Блок таймеру

- 6) Після подачі сигналу PHIPTOC1_OPERATE, запуститься осцилограф RDRE1 для виміру значень в момент аварійної події. Також всі команди відключення від всіх захистів збираються в 1 блок OR6 та потім в блок TRPPTRC1.

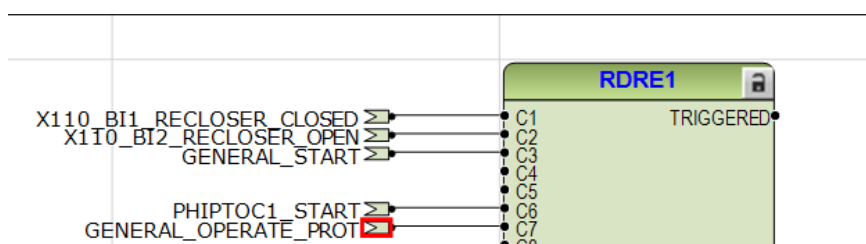


Рис.3.21 Блок осцилографа

- 7) TRPPTRC1 – блок який відповідає за всі захисти, його завданням є зібрати всі команди на відключення від аварійних подій, перетворити їх на 1 спільний сигнал відключення та передати його як команду

RECLOSER_OPEN_COMAND яка змусить замкнутися силовий контакт X100/PO3.

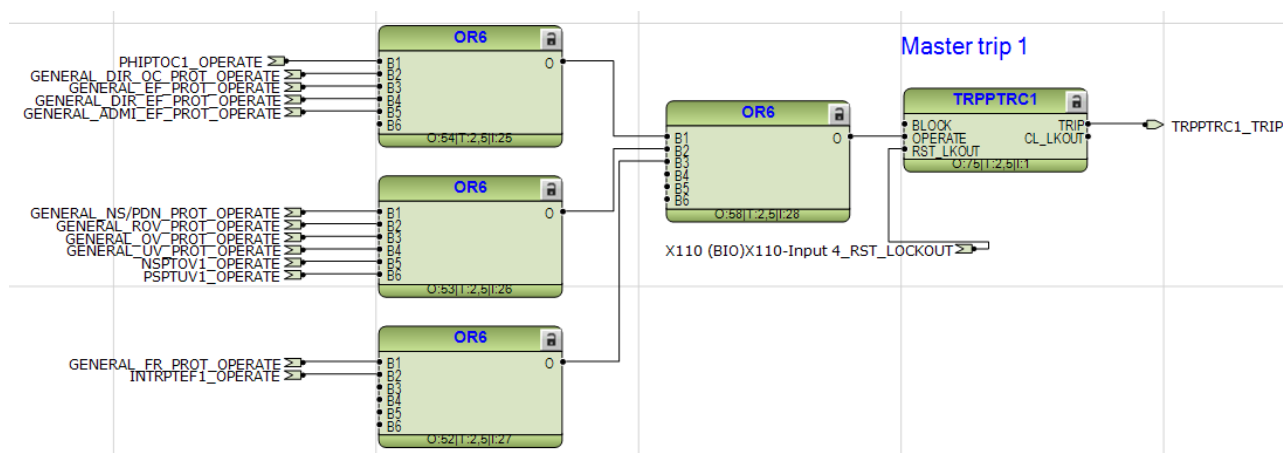


Рис. 3.21 Блок TRPPTRC1 та команди захистів

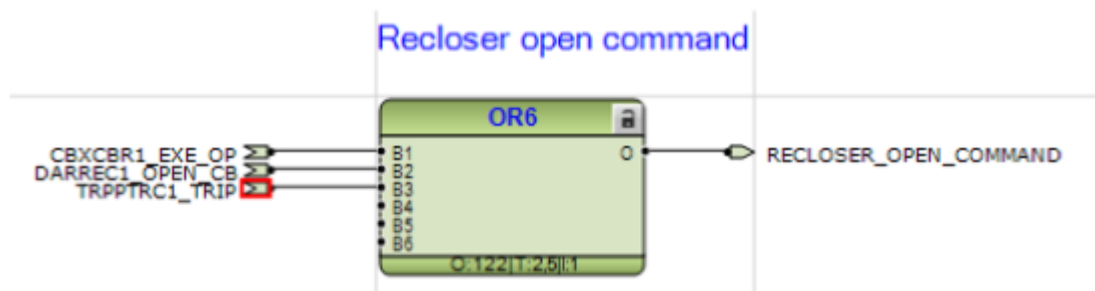


Рис. 3.22 Формування загальної команди на відключення

8) X100/PO3 подасть живлення на котушку вимкнення і реклоузер відключиться.

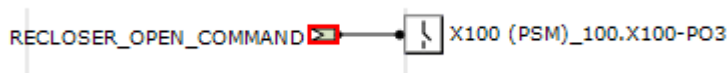


Рис. 3.23 Подача загальної команди відключення на силові контакти вимкнення реклоузера

Також має INRPHAR Three-phase inrush detector. Це детектор кидків струму. При увімкненні лінії, виникає кидок струму намагнічування який може перевищувати уставку. Тому й використовують цей детектор, щоб не було

хибного спрацювання захисту та вимкнення реклоузера. А розрізняє цей детектор по частоті. При нормальному режимі частота складає 50 Гц. При увімкненні лінії чи трансформатора ця частота спотворюється і виникає 2 гармоніка яку і розрізняє цей детектор.

При тестування можна подавати 1 фазу на струмові клема та перевищити встановлену уставку.

DPHNPDOC – схожий захист до PHNPTOC, але з деякими умовами. DPHNPDOC це як було сказано вище направлена СВ високої ступені. Це означає, що умовою спрацювання цього захисту є не лише перевищення уставки по струму, а й напрямок цього струму відносно напруги. Зазвичай в мережах 6-10кВ цей кут складає 30° . При короткому замиканні якщо це к.з. сталося перед реле, то кут струму відносно напруги буде близько $60-80^\circ$. Якщо к.з сталося позаду реле, то кут буде -180° . Система направленого захисту потрібна для селективності, тобто якщо є 2 джерела живлення, то система направленого захисту дозволяє відключати тільки ту ділянку мережі, де сталося коротке замикання, не впливаючи на інші ділянки, що живляться від іншого джерела, забезпечуючи тим самим вимкнення тільки тої ділянки де сталася аварія. . Оскільки ступінь висока, то затримка по часу складає 0,1 сек. На стенді для тестування такого типу захисту потрібно подати напругу на клема від X1:1- X1:6. Струм подавати на клема від X1:9- X1:14. При тестуванні поміняти фази струм місцями та перевищити уставку в 3А.

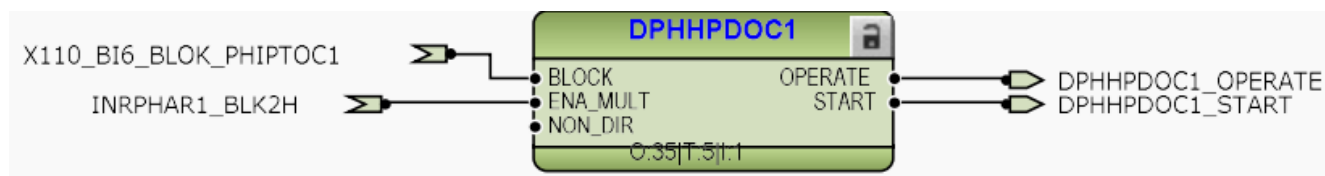


Рис. 3.23 Блок DPHNPDOC

Як і всі логічні блоки захисту його команда збирається на загальний сигнал відключення від аварійних ситуацій. Блокується накладкою для вимкнення струмових захистів.

FDPHLPDOC – аналогія DPHHPDOC, різниця полягає в тому, що FDPHLPDOC має низьку ступінь. Захисти розбиваються на ступені. (низька, висока, миттєва) (Low, High, Instantaneous). Захисти з миттєвою ступенню спрацюють заразу при виникненні аварійної ситуації. З високою – майже без затримки. З низькою можна вибрати час, зазвичай це кілька секунд.. Це потрібно для :

- Струм короткого замикання не є постійним: він максимальний на початку лінії і мінімальний в її кінці.
- Миттєва ступінь ($I > > >$) відключає тільки КЗ поблизу джерела без витримки часу, але вона фізично не здатна "побачити" аварію в кінці довгої лінії.
- Висока ($I > >$) Майже без витримки часу.
- Низька ступінь ($I >$) є більш чутливим і захищає всю лінію, але змушений мати витримку часу, щоб не спрацювати при КЗ на суміжних ділянках (селективність).

Логічний блок FDPHLPDOC має низьку ступінь, для того щоб реагувати на КЗ яке знаходиться в кінці лінії і струм біля самого реклоузера буде меншим ніж в місці аварії.



Рис.3.24 Блок FDPHLPDOC

Для тестування подавати 3.1А на струмові клемах.

NSPTOC – призначений для виявлення режиму неповнофазного навантаження, за якого провід розривається, а лінія сильно навантажена, то при неповнофазному режимі струм зворотної послідовності буде великий, але не створює короткого замикання на землю, через що основні захисти (МСЗ та ЗНЗ) залишаються нечутливими. Він реагує саме на струм зворотної послідовності.

Також АПВ не працює при роботі цього блоку, бо якщо працює цей захист, то сенсу в АПВ немає адже кабель на лінії розірваний.

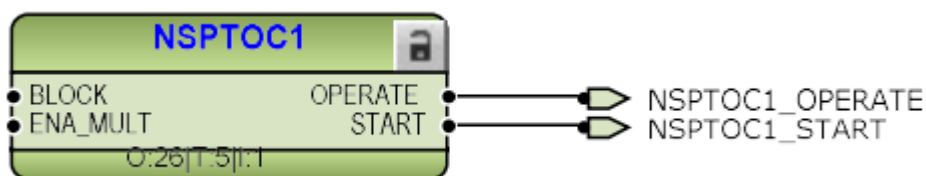


Рис. 3.25 Блок NSPTOC

Для тесту, подавати струм який не перевищує уставку та прибрати 0.

EFIPTOC призначений для вимкнення реклоузера коли відбувається замикання фази на землю. Наприклад впав дріт на землю чи гілка зачепила дріт. Якщо є витік струму, цей блок “побачить” витік і вимкне вимикач. У випадку тимчасової аварії – гілка торкнулася дроту, Реле за допомогою АПВ спробує увімкнути, якщо проблема серйозніша, дріт впав на землю чи пробило ізолятор, то захист знову відпрацює.

Earth fault protection

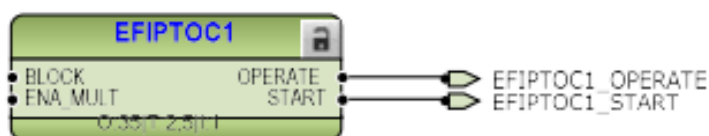


Рис. 3.26 Блок EFIPTOC

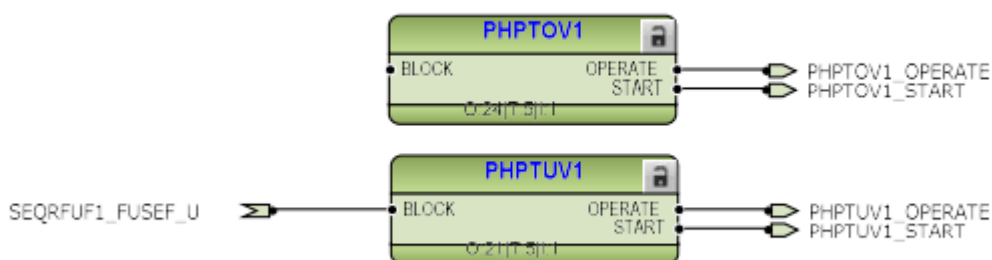
Струм подавати на X1:7 – X1:8

Блоки захисту по напрузі RHPTOV та RHPTUV. Працюють у випадку якщо напруга перевищує уставки, або падає нижче встановленого рівня напруги - RHPTUV.

Захист від підвищення напруги RHPTOV. Функціональний блок RHPTOV призначений для запобігання пошкодженню ізоляції електрообладнання мережі та споживачів внаслідок тривалого підвищення напруги понад номінальні значення. У застосуванні до реклоузера цей захист виконує роль запобіжника від аварійних

режимів, викликаних перекосом фаз, несправністю регуляторів напруги трансформаторів.

Функціональний блок PHPTOV забезпечує відключення комутаційного апарата при падінні напруги нижче встановленого критичного рівня або при повному зникненні живлення. Головним завданням цього захисту є запобігання виходу з ладу асинхронних електродвигунів споживачів, які при зниженій напрузі споживають надмірний струм і перегріваються.



3.27.Блоки захисту по напрузі PHPTOV та PHPTUV

Для випробовування потрібно подавати напругу на X0:7 – X0:12

PDNSPTOC призначений для виявлення несиметричних режимів роботи розподільчої мережі, викликаних розривом фазного провідника (режим «неповнофазного навантаження»). Цей вид пошкодження є специфічним, оскільки обірваний провід часто не торкається землі (або має високий перехідний опір), через що струми короткого замикання відсутні, і традиційні захисти (МСЗ та ЗНЗ) залишаються нечутливими. PDNSPTOC дозволяє своєчасно відключити пошкоджену ділянку, запобігаючи перегріву електродвигунів споживачів та небезпеці ураження струмом.

Принцип дії:

В основу роботи алгоритму покладено аналіз співвідношення симетричних складових струму. Блок безперервно обчислює відношення струму зворотної послідовності до струму прямої послідовності

PDNSPTOC схожий до NSPTOC, але PDNSPTOC зреагує при малих струмах і малому навантаженні лінії. Також при роботі PDNSPTOC лінія швидше за все розірвана і АПВ не спрацює. Ці 2 захисти доповнюють один одного тому мають спільний сигнал на відключення.

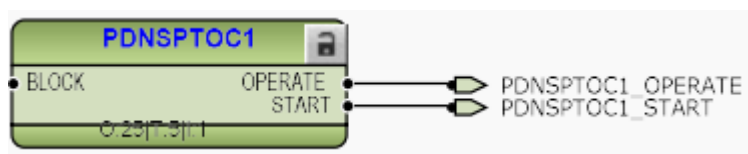


Рис. 3.28 Блок PDNSPTOC

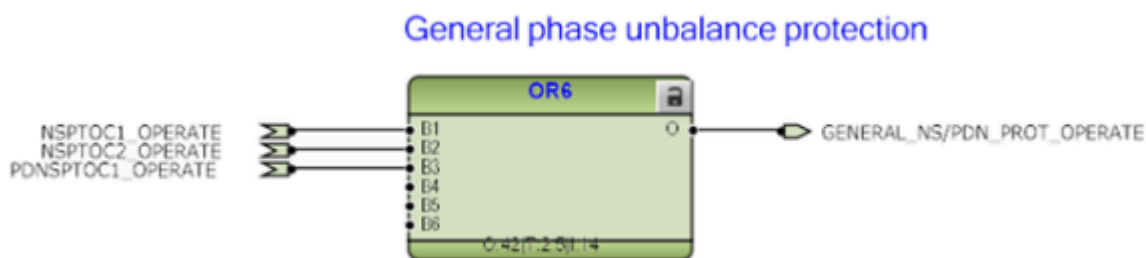


Рис. 3.29 Утворення спільного сигналу на відключення блоками PDNSPTOC та NSPTOC

3.11 Логічні блоки контролю

У структурі мікропроцесорного захисту RER615 система контролю виконує функцію координатора, що забезпечує взаємодію між алгоритмами захисту, автоматикою повторного ввімкнення та фізичним приводом вимикача. До цієї групи належать функціональні блоки, які відповідають за формування команд увімкнення та вимкнення (CBXCBR1), реалізацію циклів АПВ (DARREC1), моніторинг стану комутаційного апарату (SSCBR1, TCSSCBR1) та керування режимами роботи пристрою (SPCGAPC1). На відміну від блоків захисту, що реагують на аварійні параметри мережі, блоки контролю оперують дискретними логічними сигналами, забезпечуючи перевірку умов блокування, синхронізацію команд та індикацію стану системи. Нижче розглянуто призначення та алгоритми роботи основних функціональних елементів цієї системи.

CBXCBR1 Circuit Breaker Control Головний функціональний блок управління вимикачем. Він є точкою, через яку проходять усі команди на увімкнення або відключення (як автоматичні, так і ручні). Його завдання - перевірити умови безпеки (блокування) перед тим, як виконати команду. До нього приходять команди про стан реклоузера X110_BI2_RECLOSER_OPEN (реклоузер вимкнтий), X110_BI1_RECLOSER_CLOSE (реклоузер увімкнтий). Ці сигнали йдуть з дискретних входів BI2, BI1, а на дискретні входи поступають з контактів реклоузера (РП-8), 7-3 нормально замкнутий контакт – реклоузер вимкнуто, 11-15 нормально розімкнутий контакт – реклоузер увімкнуто. Сигнал RECLOSER_ENABLE_CLOSE, це сигнал на дозвіл увімкнення. Цей сигнал утворюється в блоці AND і щоб блок AND видав сигнал потрібні команди про готовність приводу (MVGAPC1_RECLOSER_READY), команда про те що реклоузер вимкнуто (X110_BI2_RECLOSER_OPEN) і тільки тоді він буде видавати логічну 1 (працюватиме) та буде дозвіл на включення.

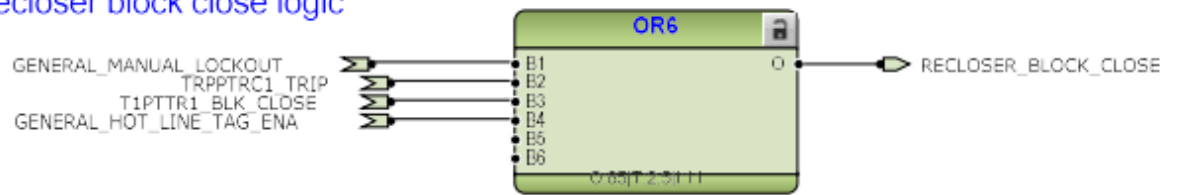
Команда RECLOSER_BLOCK_CLOSE, призначена для блокування увімкнення. Утворюється в блоці OR6 і для її виконання потрібні такі умови:

- TRPPTRC1_TRIP, головний сигнал відключення, якщо він дійсний увімкнути реклоузер не вдасться.
- T1PTTR1_BLK_CLOSE, тепловий захист.
- GENERAL_HOT_LINE_TAG_ENA, блокування захистів.

Команди EXTERNAL_OPEN_COMMAND та EXTERNAL_CLOSE_COMMAND, Це команди на відключення та включення від ключа управління SA1 відповідно. Приходять вони від BI7 та BI8.

Сигнали які виходять з блоку CBXCBR1. CBXCBR1_EXE_OR, CBXCBR1_EXE_CL це імпульсні сигнали які формують загальний сигнал на включення та виключення (RECLOSE_OPEN_COMMAND, RECLOSE_CLOSE_COMMAND), що йде на дискретні виходи PO2 та PO3.

Recloser block close logic



Recloser enable close logic



Рис. 3.30 Формування сигналів на блокування увімкнення та на дозвіл увімкнення

Recloser control and interlocking

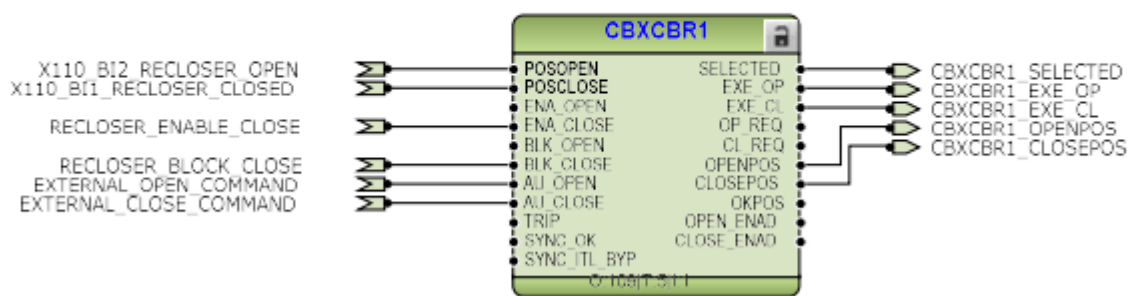


Рис. 3.31 Головний функціональний блок управління вимикачем

Recloser close command



Recloser open command



Рис. 3.32 Формування команди на вимкнення і увімкнення реклоузера. Має 3 сигнали. Від АПВ, блоку контролю, захистів

Блок АПВ DARREC1 Забезпечує автоматичне відновлення живлення лінії після відключення її захистом.

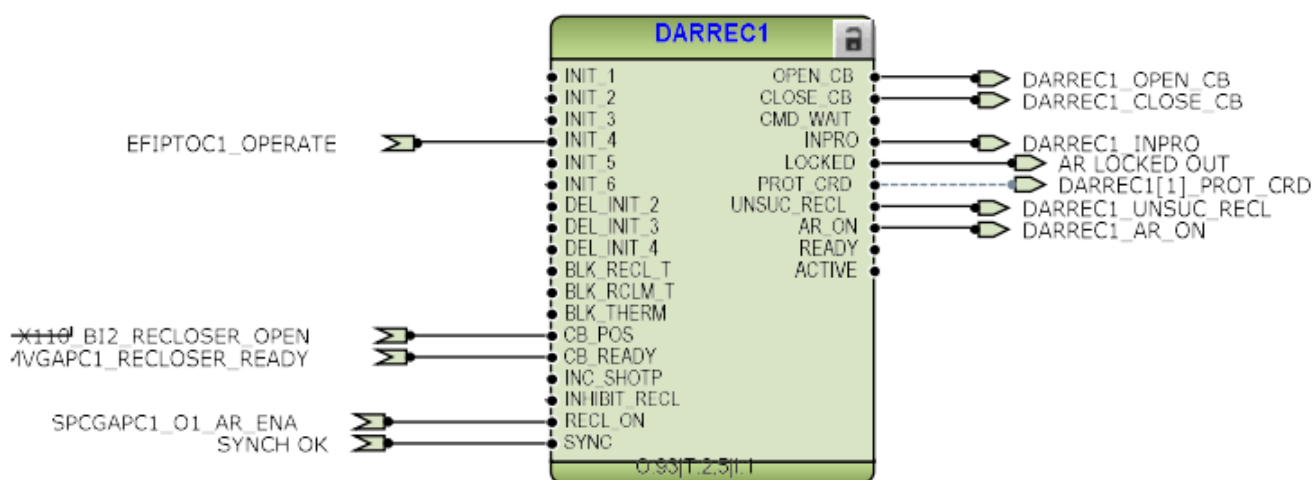


Рис. .3.33 Логічний блок АПВ DARREC1

Блок АПВ має такі входи :

- INIT_1...6 – ці входи призначенні для запуску АПВ від спрацювання конкретного захисту. Коли спрацьовує захист наприклад EFIPTOC1_OPERATE і сигнал від триває захисту не більше 2 сек. То спрацьовує АПВ. Якщо сигнал від якогось захисту не буде підключений до жодного входу INIT, то після спрацювання цього захисту, АПВ працювати не буде. Розділення захистів на різні входи INIT дозволяє гнучко налаштувати кількість черг АПВ, час очікування на спрацювання АПВ після роботи різних захистів.

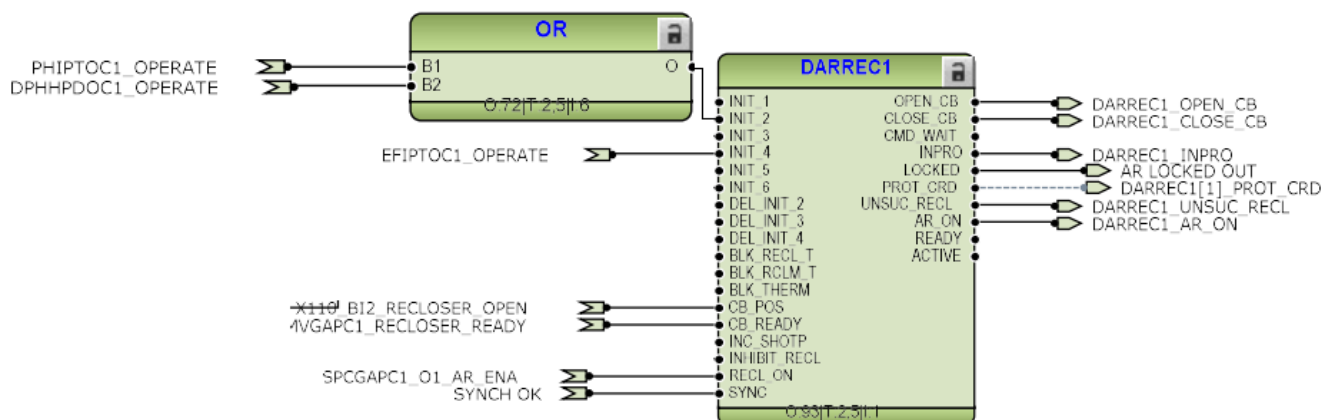


Рис. 3.34 Приклад сигналів від захистів після яких спрацює АПВ

- DEL_INIT_2...4 – Схожі до попередніх входів, виконують ту саму функцію, але мають додаткову затримку по часу, тобто час очікування не відраховує час зразу, а має затримку до отримання сигналу TRIP.
- BLK_RECL_T – це блокування часу спрацювання АПВ. Наприклад коли відпрацював захист і АПВ почав рахувати час (запуск таймера АПВ), щоб увімкнутися, а в цей момент спрацював BLK_RECL_T, то таймер ставиться на паузу і запуститься знову коли сигнал з BLK_RECL_T пропаде.
- BLK_RCLM_T – це блокування готовності АПВ. Після спрацювання АПВ реле "чекає", щоб переконатися, що лінія стабільна. Тільки після закінчення цього часу АПВ вважається успішним, лічильник спроб скидається, і реле готове до нового циклу. Якщо подати сюди "1", таймер Reclaim Time зупиняється. Це не дає АПВ завершити цикл і скинути лічильник спроб.
- BLK_THERM – це блокування АПВ при тепловому захисті. Не можна включати обладнання в роботу доки воно перегріте.
- CB_POS – сигнал приходить з дискретного входу BI2 і інформує блок АПВ про те стан реклоузеру, якщо сигнал приходить, то реклоузер увімкнуто (значення TRUE), якщо сигнал не приходить реклоузер вимкнуто (FALSE).
- CB_READY – сигнал який приходить на цей вхід інформує блок про готовність запуску нового циклу АПВ.
- INC_SHOTP (Increment Shot Pointer) – сигнал який приходить якщо спроба АПВ виявилася неуспішною. То АПВ вибирає іншу групу уставок, більш грубу та переходить до наступного циклу АПВ з іншими уставками.
- INHIBIT_RECL – блокування циклу АПВ від захистів. Наприклад якщо підключити на цей вхід сигнал від роботи якогось захисту, то після роботи цього захисту АПВ не спрацює. В нашому випадку туди заведені сигнали з NSPTOC1_OPERATE і PDNSPTOC1_OPERATE.

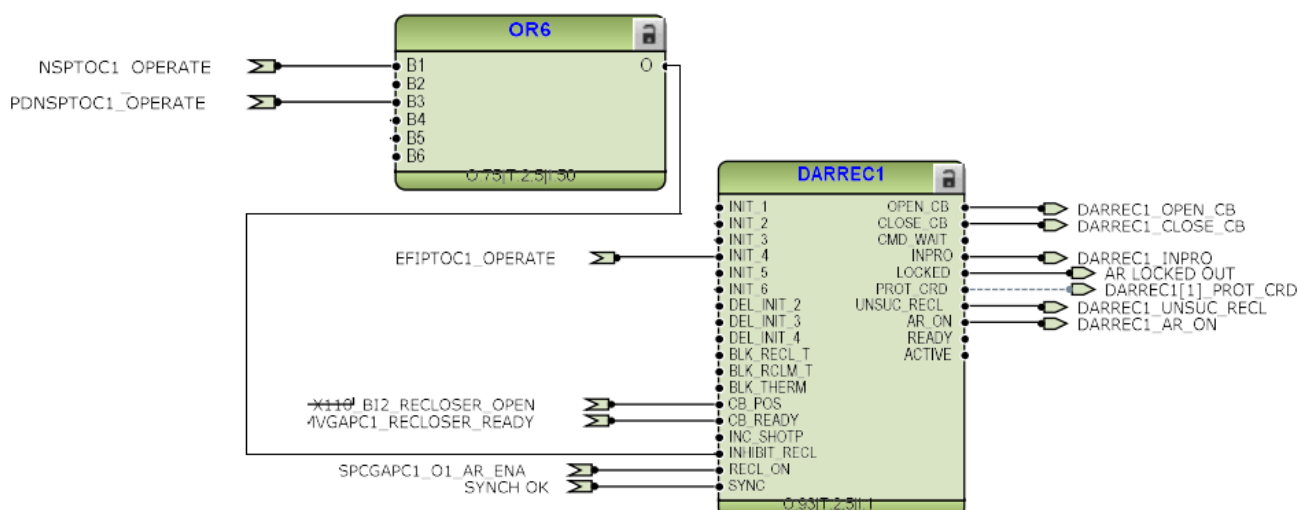


Рис. 3.35 Блокування роботи АПВ при роботі певних захистів

Вихідні сигнали блоку АПВ:

- DARREC1_OPEN_CB – це сигнал який вимикає вимикач. Зазвичай АПВ не вимикає вимикач, але має таку можливість при певних умовах таких як АПВ неуспішне або потрібно відмінити цикл АПВ.
- DARREC1_CLOSE_CB – це сигнал який вмикає реклоузер. Цей сигнал збирається в блоці OR6 та утворює разом з іншими сигналами загальну команду на увімкнення, на рисунку 3.32
- DARREC1_INPRO – подає сигнал в момент виконання циклу АПВ.
- AR_LOCKED_OUT – АПВ неуспішне або заблоковане.
- DARREC1_PROT_CRD - Сигнал узгодження захистів. Використовується в складних алгоритмах, коли потрібно змінити групу уставок або логіку роботи захистів залежно від того, яка це спроба АПВ. Наприклад, перед першим АПВ захист може бути миттєвим, а після нього (коли є цей сигнал) — з витримкою часу.
- DARREC1_UNsuc1_RECL - Імпульс "Неуспішне АПВ". Короткочасний сигнал, який видається в момент переходу в стан LOCKED_OUT (стан блокування)..
- DARREC1_AR_ON - Це статичний сигнал, який є активним («1») завжди, коли функція АПВ програмно дозволена

Функціональний блок SSCBR1 призначений для безперервного моніторингу технічного стану вимикача або реклоузера. Він аналізує сигнали положення та інші параметри, щоб виявити несправності в механіці або електричних колах приводу та попередити персонал про необхідність обслуговування.

Блок постійно зчитує стан дискретних входів, що відображають положення вимикача (Open/Closed), і виконує кілька перевірок:

1. Контроль положення: Перевіряє логічну відповідність сигналів від допоміжних контактів.
 - Якщо одночасно приходять сигнали "Увімкнено" (1) і "Вимкнено" (1) — це аварія (залипання контактів або КЗ у вторинних колах).
 - Якщо одночасно немає ні "Увімкнено" (0), ні "Вимкнено" (0) — це аварія (обрив кіл або проміжний стан).
2. Час ходу: Вимірює час переходу з одного стану в інший. Якщо вимикач вмикається занадто повільно (наприклад, загусло мастило або сіла пружина), блок видає попередження.
3. Облік ресурсу: Рахує кількість циклів увімкнення-вимкнення та обчислює знос контактів (на основі величини відключеного струму).
4. Контроль пружини: Слідкує за часом заведення пружини. Якщо мотор працює занадто довго, це ознака несправності механізму.

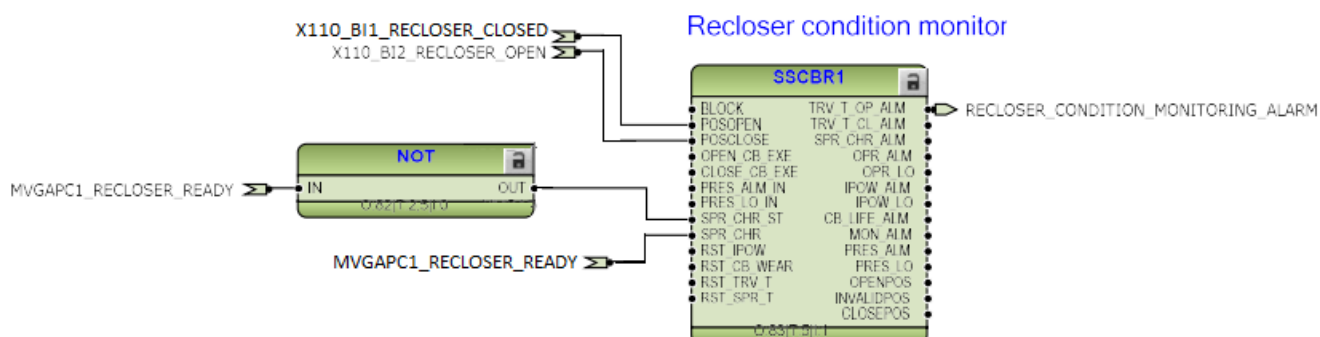


Рис. 3.36 Функціональний блок SSCBR1

Видає сигнал на світло діод (LED10), при виявленні проблем зі приводом чи з колами панелі. Можна просимулювати його роботу якщо одночасно замкнути

(подати напругу) на ВІ1 та ВІ2 положення вимикача. Блок подумає, що контакти вимикача залипили і подасть сигнал про це.

TCSSCBR1 блок призначений для контролю цілісності кіл вимикача. Він постійно подає дуже малий струм через нормально замкнутий контакт. Коли котушка вимикача пошкоджується, чи живлення вимикача переривається (обірвався дріт, поганий контакт), блок видасть сигнал який разом з сигналом від SSCBR1 активують LED10.

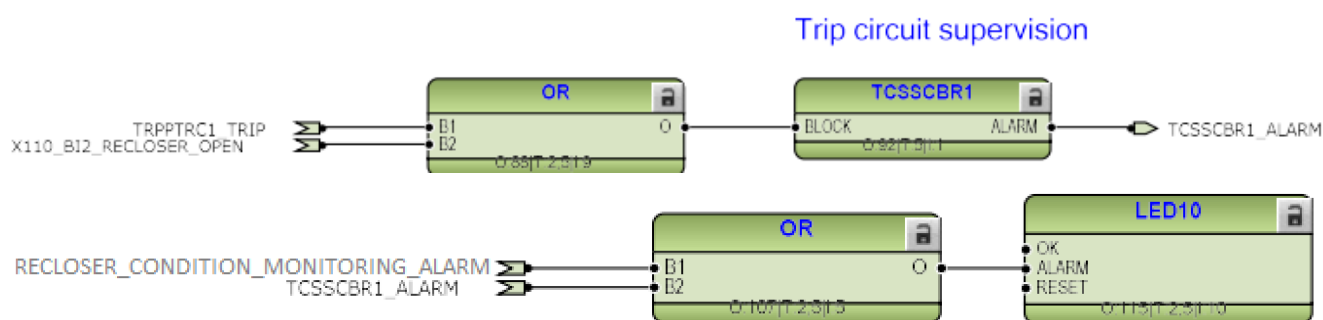
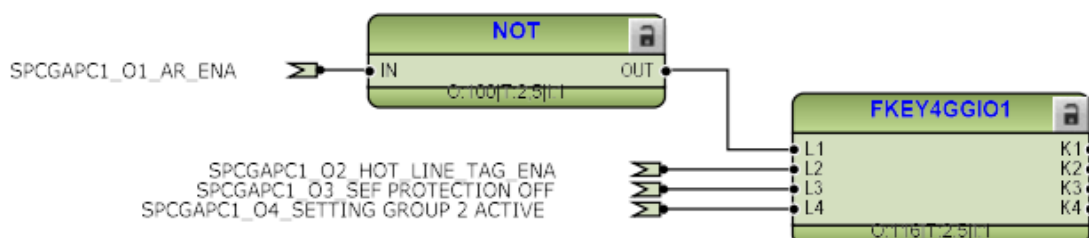


Рис. 3.37 Функціональний блок TCSSCBR1 та дія на LED10

SPCGAPC1 та FKEY4GGIO1 ці 2 блоки потрібні для призначення кнопкам функцій на панелі. Слугує програмним інтерфейсом для чотирьох програмованих кнопок (F1, F2, F3, F4), розташованих на передній панелі реклоузера. Він дозволяє керувати пристроєм без використання периферії. Ця функція дозволяє дублювати функції периферійних приладів, якщо вони вийшли з ладу та екстрено вимкнути вимикач при відмові ключа управління.

- Кнопка F2 запрограмована на блокування увімкнення.
- F3 блокування ЗНЗ.
- F4 ввід 2 групи уставок.



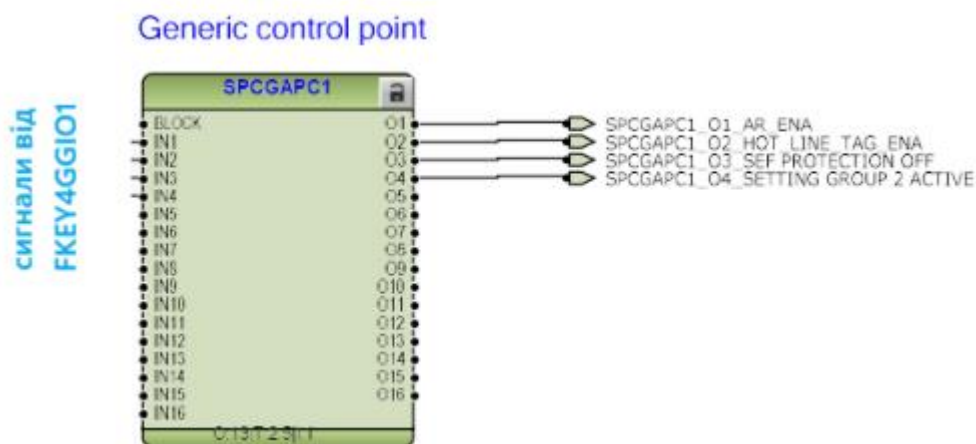


Рис. 3.38 Функціональні блоки SPCGAPC1 та FKEY4GGIO1

3.12 Струмові кола та кола напруги

- Струмові кола

Призначенні для передачі інформації про величину фазних струмів та струму нульової послідовності від первинного обладнання до терміналу захисту. Працюють таким чином :

1. Вхідні трансформатори: Всередині реле (на платі аналогових входів) встановлені проміжні трансформатори струму, які гальванічно розв'язують вторинні кола від електроніки та знижують струм до рівня, придатного для обробки (міліампери).
2. Шунти та АЦП: Вторинний струм протікає через прецизійні шунти, створюючи падіння напруги. Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) зчитує цю напругу з високою частотою дискретизації (наприклад, 32 точки на період), перетворюючи її в цифровий код.
3. Обробка (Блок CMMXU): Процесор виконує ДПФ (дискретне перетворення Фур'є), виділяючи основну гармоніку та розраховуючи діюче значення (RMS) струму.

Напругові кола: Вимірювання фазних напруг та напруги нульової послідовності . Необхідні для роботи захистів по напрузі, частоті та для направлених захистів. Принцип роботи схожий до струмових але з деякими

нюансами. Вони використовуються резистивні дільники напруги або проміжні трансформатори напруги.

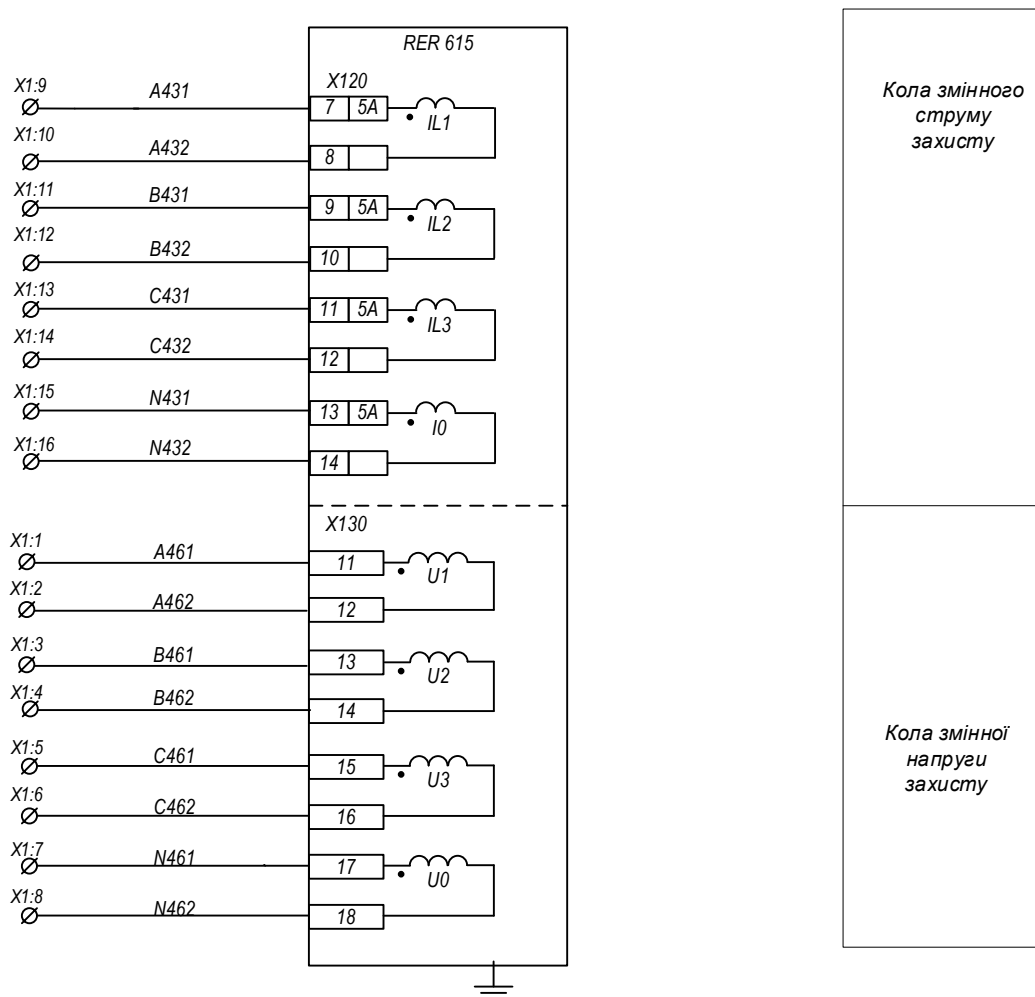


Рис. 3.39 Схема струмових та кіл напруги

3.13 Проведення тестів захистів панелі

1. РНІРТОС (СВ - Ненаправлена)

- Проводи ЛАТРа підключити на фазу А (X120:7-8) В (X120:9-10) С (11-12).
Струм уставки 5А. Час спрацювання 0 сек.

2. ДРННРДОС (СВ - направлена)

- Проводи ЛАТРа підключити на фазу А (X120:7-8) В (X120:9-10) С (11-12).
Струм уставки 4,5А, час спрацювання 3 сек.
- Напругу подати ~ 100+ В на клеми (X130:11-12)

- Можна поміняти 0 та фазу місцями та перевищити уставки

3. FDPHLPDOC (МСЗ – направлене)

- Проводи ЛАТРа підключити на фазу А (X120:7-8) В (X120:9-10) С (11-12).
Уставка струму 2 А, час 2 сек.
- Напругу подати ~ 100+ В на клеми (X130:11-12)

4. NSPTOC (МСЗ – зворотної послідовності)

- Проводи ЛАТРа підключити на фазу А (X120:7-8). Струм уставки 0,05А.
Час спрацювання 0 сек.

5. EFIPТОС (ЗНЗ - Ненаправлений)

- Проводи ЛАТРа підключити (X120:13-14). Струм уставки 5А, час 0 сек.

6. PHPTOV (Перенапруга)

- Проводи ЛАТРа підключити на (X130:11-12). Напруга уставки 100В, час 0 сек.

7. PHPTUV (Недонапруга)

- Проводи ЛАТРа підключити на (X130:11-12). Напруга уставки 80В, час 0 сек.

8. PDNSPTOC (Обрив фази)

- Проводи ЛАТРа підключити на (X120:7-8). Струм уставки 0,05А. Час 0 сек.
Можна подати менший струм, але прибрати 0 провід з клеми X120:8.

Для спрацювання АПВ не подавати задані параметри не більше 2 сек. АПВ не діє на захисти по напрузі, а також на захисти які реагують на обрив фази. КТТ RER615 становить 200/1, напруга на первинній стороні 10кВ.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Заходи безпеки при проведенні лабораторних робіт з стендом

На кафедрі електричної інженерії Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя було розроблено лабораторний стенд на базі мікропроцесорного реле RER-615, який є сучасним інструментом для вивчення релейного захисту та електроавтоматики. Система стенду розроблена у вигляді макету захисту реальної комірки 10 кВ (вводу або фідера), що дозволяє імітувати та досліджувати широкий спектр аварійних ситуацій і режимів роботи. Завдяки програмуванню та моделюванню захисту, максимально наближеному до реальних умов експлуатації, стенд надає унікальні можливості для навчання, практичного закріплення знань і тестування алгоритмів роботи релейного захисту. Такий підхід сприяє глибокому розумінню принципів функціонування систем захисту, а також допомагає освоїти роботу з сучасним обладнанням, що є важливим елементом підготовки фахівців у галузі електроенергетики.

Схема стенда розроблялася з урахуванням потреб навчального процесу. Наприклад, клемники дозволяють зручно подавати імітовані сигнали струму та напруги, перевіряти роботу захистів за різними параметрами, а також тестувати алгоритми роботи автоматики. Особливістю стенда стало використання мікропроцесорного реле RER-615, що забезпечує високу гнучкість у налаштуванні функцій захисту, включаючи максимальний струмовий захист, струмову відсічку, захисти по напрузі та частоті.

Лабораторний стенд складається з мікропроцесорного реле RER-615, макета вимикача 10 кВ із системою пружинного приводу, мнемосхеми, сигнальних ламп, кнопок для імітації аварійних ситуацій, струмових і напругових кіл, а також допоміжних реле та перемичок для налаштувань (рис. 4.1).

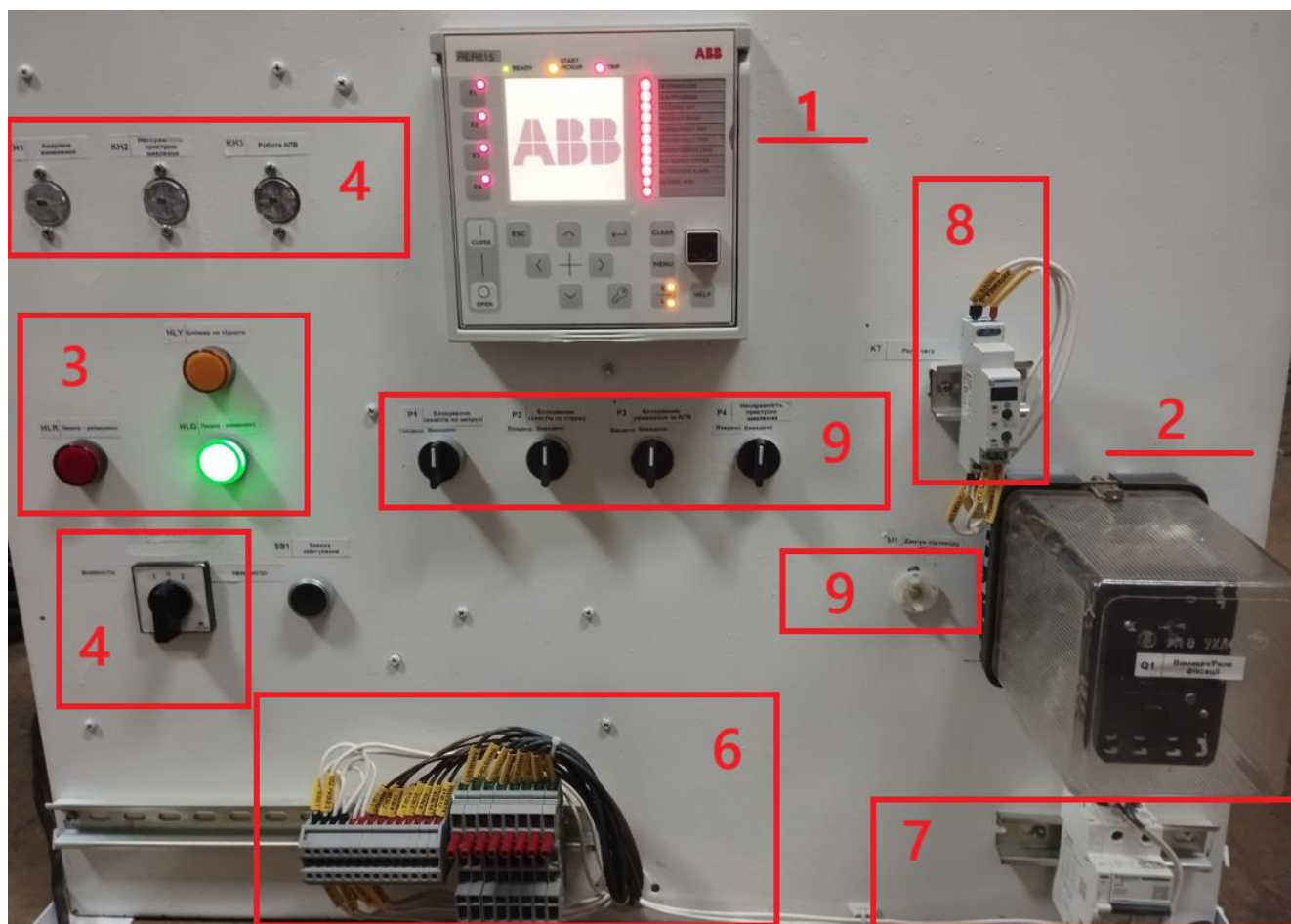


Рисунок 4.1 – Стенд мікропроцесорного релейного захисту:

1- пристрій RER 615; 2 – макет реклоузера 10 кВ; 3 – світлові індикатори; 4 – блінкери; 5 – ключ управління RER 615; 6 – комутація електричних кіл стенду; 7 – вимикач живлення стенду; 8 – реле часу; 9 – імітатори режимів роботи стенду; 10 – імітатор електроприводу;

Стенд універсальний і дозволяє працювати в трифазних мережах з ізольованою і заземленою нейтраллю. Живлення стенда здійснюється від однофазної мережі напругою 220 В. Під час експлуатації електроустановки виникає небезпека механічних ушкоджень і ураження електричним струмом персоналу. З метою запобігання цим факторам небезпеки всі механічні вузли електроприводу, які обертаються, закриті металевим корпусом стенду. В силових струмопроводах застосована подвійна ізоляція, швидке відключення схеми в аварійних режимах, яке здійснюється автоматичним вимикачем. Корпус стенду має систему заземлення.

Так як в лабораторний стенд входять компоненти, що легко загоряються, то в лабораторії передбачені засоби пожежогасіння [32]. Матеріали, які можуть загорітися в процесі експлуатації електроустаткування внаслідок перегріву, це

є: ізоляція проводів; фарба, якою покриті корпуси машин; елементи кола керування і лабораторний стіл.

До основних засобів пожежогасіння, що знаходяться в лабораторії, відноситься вогнегасник повітряно-пінний типу ОВП-5.

4.2 Розрахунок захисного заземлення обладнання лабораторії

Роботи в діючих електроустановках, як до так і вище 1000 В входять до переліку робіт з підвищеною небезпекою, затвердженого наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці [33].

Розроблений лабораторний стенд на базі мікропроцесорного реле RER-615 для вивчення релейного захисту та електроавтоматики є потенційним джерелом випадкового ураження студентів і технічного персоналу електричним струмом. Так як стенд буде експлуатуватися в новоствореній лабораторії «Систем управління електропостачанням», було прийнято рішення виконати розрахунок захисного заземлення цієї лабораторії.

Електробезпека експлуатації електричних установок (ЕУ) у разі виникнення напруги непрямого дотику і напруги кроку забезпечує захисне заземлення. *Захисне заземлення* – це заземлення точки або точок електричної системи та струмопровідних частин ЕУ з метою безпечного функціонування та використання [34]. Призначення захисного заземлення – усунення небезпеки ураження електричним струмом у разі порушення ізоляції і появи напруги на корпусі ЕУ. Принцип дії – перетворення замикання на корпус в однофазне замикання (замикання між фазним та нульовим проводами), яке здатне забезпечити спрацювання систем захисту і автоматичне від'єднання пошкодженої ЕУ від джерела живлення (ДЖ). Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) обмежують найбільші опори заземлення [35]:

- для електроустановок напругою до 1000 В:
- при сумарній потужності генераторів або трансформаторів в мережі живлення не більше 100кВт або 100 кВА – 10 Ом;
- в інших випадках – 4 Ом;

У мережах із заземленою нейтраллю до 1 кВ використання занулення і захисного заземлення зменшує потенціал корпусу до безпечної величини і забезпечує швидке та надійне вимикання пошкоджених ЕУ за рахунок спрацювання струмового захисту, оскільки струм замикання I_k в цьому випадку дорівнює сумі двох складових: струму I'_k через занулення і струму через захисне заземлення I''_k , а потенціал корпусу: $I'_k = I''_k > R$ [37].

Згідно ПУЕ, в установках вище 1000 В із малими струмами замикання на землю опір заземлюючого контуру (пристрою) повинен задовольняти умову:

$$10 \geq R_3 \leq \frac{250}{I_3} \quad (4.1)$$

де 250 - потенціал землі, В;

I_3 - розрахунковий струм замикання на землю, який протікає через заземлювач, А.

В нашому випадку заземлюючий пристрій при потребі може використовуватися для установок напругою вище 1000 В, а також для установок до 1000 В і для приєднання до заземлюючого контуру грозозахисту з метою захисту обладнання стенду. В цьому випадку згідно ПУЕ опір заземлення не повинен перевищувати 4 Ом:

$$R_3 \geq 4 \text{ Ом}$$

Знаходимо опір вертикально забитого в землю електрода:

$$R_{el} = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2e}{d} + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{4t+l}{4t-l} \right) \right) \quad (4.2)$$

де ρ - опір землі 120 Ом;

l - довжина електрода, м;

t - відстань від центру електрода до поверхні землі.

$$R_{el} = \frac{120}{2\pi 5} \left(\ln \frac{2 \times 5}{0.012} + 0.5 \ln \frac{(4 \times 3.3 + 5)}{(4 \times 3.3 - 5)} \right) = 27.1 \text{ Ом}.$$

Знаходимо необхідну кількість вертикально забитих електродів

$$n = \frac{R_{el}}{\eta R_{don}}, \quad (4.3)$$

де η - коефіцієнт використання заземлювачів - 0,66.

$$n = \frac{27.1}{0.66 \times 4} = 10.3 \approx 11 \text{ шт}$$

Знаходимо опір з'єднувальної полоси

$$R_n = \frac{\rho}{2\pi e} \ln \frac{l_n^2}{0.5\pi n h}, \quad (4.4)$$

де l_n - довжина полоси, м ;

e - ширина полоси, м;

h - глибина заложення полоси, м.

$$R_n = \frac{120}{2\pi 120} \ln \frac{120^2}{0.5 \times 0.04 \times 0.8} = 6.3 \text{ Ом}$$

$$R_3 = \frac{R_{el}}{n\eta} = R / \left(\frac{R_{el}}{n\eta} + R_n \right) = \frac{27.1}{11 \times 0.66} 6.3 / \left(\frac{27.1}{11 \times 0.66} + 6.3 \right) = 2.3 \text{ Ом}$$

Цей опір менший від потрібного, і так як різниця не дуже велика і цим підвищуються умови безпеки. Отже, приймаємо цей результат як кінцевий.

4.3 Заходи безпеки життєдіяльності в електроустановках

З метою забезпечення нормальних умов праці і життєдіяльності технічного персоналу та студентів при роботі із розробленим лабораторним стендом були застосовні такі технічні захисні заходи: мала напруга, контроль пошкодження ізоляції, забезпечення недоступності струмопровідних частин, захисне заземлення і занулення, подвійна ізоляція і захисне відключення [36, 37].

Мала напруга - це напруга не більше 42 В між фазами і відносно землі, що застосовується для зменшення небезпеки ураження електричним струмом. У виробничих умовах ПУЕ передбачають застосування двох малих напруг 12 і 36 або 42 В. Напруга до 42 В включно повинна застосовуватися в приміщеннях з підвищеною небезпекою і особливо небезпечних для живлення таких

електроприймачів: ручних електрифікованих інструментів без подвійної ізоляції, переносних ламп, світильників місцевого стаціонарного освітлення з лампами накачування, світильників загального освітлення звичайної конструкції з лампами розжарювання, розміщених над підлогою на висоті менше 2,5 м. Напруга не вище 12 В повинна застосовуватися для живлення ручних переносних ламп в особливо небезпечних приміщеннях при особливо несприятливих умовах роботи: в обмежених умовах або при зіткненні працюючого з великими металевими заземленими конструкціями.

Електрична ізоляція - це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, якими покривають поверхні струмопровідних елементів або якими струмопровідні елементи відокремлюють від інших частин.

В електроустановках застосовують такі види ізоляції:

робоча ізоляція - електрична ізоляція струмопровідних частин електроустановки, що забезпечує її нормальну роботу і захист від ураження електричним струмом;

додаткова ізоляція - електрична ізоляція, передбачена додатково до робочої ізоляції для захисту від ураження електричним струмом на випадок пошкодження робочої ізоляції;

подвійна ізоляція - електрична ізоляція, що складається з робочої та додаткової ізоляції;

посилена ізоляція - поліпшена робоча ізоляція, що забезпечує таку ж ступінь захисту від ураження електричним струмом, як і подвійна ізоляція.

Блокування безпеки - це пристрої, що запобігають потраплянню технічного персоналу і студентів під напругу внаслідок помилкових дій. В кваліфікаційній роботі було використано механічне, електричне і електромагнітне блокування.

Механічне блокування застосовується в електричних апаратах (рубильниках, пусках, автоматичних вимикачах), а також в комплектних розподільних пристроях.

Електричне блокування застосовується в технологічних електроустановках напругою до 1000 В і випробувальних стендах при будь-яких напругах. Блокування відключає напругу від електроустановки при відкриванні дверей огоро-

жень і дверцят кожухів або при знятті кришок. Для відключення напруги служать блокувальні контакти, які можуть включатися безпосередньо в силове коло або в коло управління пускового апарату, якщо управління електроустановкою дистанційне.

Електромагнітне блокування (ЕМБ) вимикачів, роз'єднувачів і заземлювальних ножів широко застосовується при різних схемах з'єднання обладнання і забезпечує певну послідовність включення і відключення цих апаратів. ЕМБ дозволяє виключити виникнення небезпечних ситуацій: включення або відключення роз'єднувача під навантаженням, включення заземлювальних ножів на ділянку лінії під напругою, подачу напруги на заземлений ділянку лінії.

Крім того, в роботі розраховано та використано *захисне заземлення* (пункт 4.2 кваліфікаційної роботи), яке призначене для усунення небезпеки ураження електричним струмом у випадку дотику до корпусу та інших неструмопровідних частин електроустановок, які опинилися під напругою внаслідок замикання на корпус та інших причин.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу – виконано розробка лабораторного стенду для імітації аварійних режимів в системі 10 кВ на базі мікропроцесорного пристрою RER 615. За результатами проведених в кваліфікаційній роботі досліджень та розробок були отримані наступні результати.

1. Виконано розробку лабораторного стенду для тестування імітації роботи систем електричного захисту, який включає фізичні та програмовані компоненти, що забезпечують точне моделювання сценаріїв аварій та роботи систем захисту.

2. Розроблено систему сигналізації та індикації, яка забезпечує швидке виявлення аварійних ситуацій. Фізична реалізація сигналізації дозволяє оперативному персоналу швидше реагувати на відхилення, що забезпечує ефективність моніторингу стану обладнання.

3. Реалізовано вимірювальні входи для вимірювання вторинних параметрів електричного струму, які необхідні для коректної роботи мікропроцесорного реле, зокрема для спрацьовування функціональних блоків захисту – максимального струмового захисту і захисту від перенапруги та частоти.

4. Реалізовано функції керування та захисту для моделювання процесів увімкнення та вимкнення вимикача 10 кВ, а також роботу дугового захисту.

5. Виконано налаштування програмованої логіки пристрою для адаптції його під специфічні завдання, включаючи створення складних алгоритмів для захисту, управління та сигналізації, що робить його універсальним інструментом у будь-яких умовах.

6. Розроблено систему підзаведення приводу для автоматичної фіксації несправності і сигналізації про неї, що забезпечує додатковий рівень надійності роботи вимикача.

Лабораторний стенд є високотехнологічним інструментом для дослідження і тестування електричних захистів, що робить його важливим компонентом для розвитку сучасних електроенергетичних систем.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Правила улаштування електроустановок. – [Чинний від 2017-01-01]. – Київ : Мінпаливенерго України, 2017. – 617 с.
2. Кідиба В. П. Релейний захист електроенергетичних систем : підручник / В. П. Кідиба. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 504 с.
3. Баталов А. Г. Релейний захист та автоматика електричних мереж : навчальний посібник / А. Г. Баталов, О. В. Кулаков. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 280 с.
4. Шавьолкін О. О. Автоматизація розподільчих електричних мереж : навч. посіб. / О. О. Шавьолкін. – Київ : Техніка, 2014. – 216 с.
5. Технічна документація ABB. Grid Automation. 615 series. Technical Manual. – ABB Oy, Distribution Solutions, 2019. – 868 p.
6. Оробчук Б. Я. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / Б. Я. Оробчук. – Тернопіль : ТНТУ ім. І. Пулюя, 2020. – 64 с.
7. Гончар С. О. Сучасні засоби релейного захисту та автоматики : конспект лекцій / С. О. Гончар. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 112 с.
8. Novatek-Electro. Реле часу REV-114. Керівництво з експлуатації. – Одеса : ТОВ «Новатек-Електро», 2021.
9. Siemens AG. Power System Protection. SIPROTEC 5. Application Guide. – Berlin : Siemens AG, 2018. – 350 p.
10. Технічні характеристики micom посилання URL: <https://www.se.com/ua/uk/product-range/60758-micom-p12x/#overview>
11. Махлін П.В., Костенко С.Ю., Кузьменко О.П. Інтелектуальні пристрої релейного захисту та автоматики: навч. посібник. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 256 с.
12. Двигун постійного струму технічні характеристики, посилання URL: <https://eurozakup.com.ua/product-rs550-dvigatel-postoyannogo-toka-11-zubcov-25-v-dlya-akkumulyatornoy-dreli-elektricheskoy-otvertki-17755077703.html>
13. Grid Automation Recloser Protection and Control RER615
14. Grid Automation REC615 and RER615 Operation Manual
15. Бунько В. Я. Автоматизація електроенергетичних систем : навч. посібник / В. Я. Бунько, А. В. Глухенький. – Львів : Магнолія 2006, 2018. – 368 с.

16. Реклоузер від selinc, посилання ULR: <https://selinc.com/products/651R/>
17. IEEE Std C37.104-2012. IEEE Guide for Automatic Reclosing of Line Circuit Breakers for AC Distribution and Transmission Lines. – New York : IEEE Standards Association, 2012. – 58 p.
18. Липчанський М. В. Інтелектуальні електричні мережі Smart Grid : навч. посібник / М. В. Липчанський. – Одеса : ОНПУ, 2019. – 145 с.
19. Gers J. M. Protection of Electricity Distribution Networks / J. M. Gers, E. J. Holmes. – 3rd ed. – London : Institution of Engineering and Technology (IET), 2011. – 368 p
20. Блок живлення, посилання URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/blok-zhyvlennia-shcho-vbudovuietsia-200w-24v-lrs-200-24_108696.html
21. Козичук О. Д. Автоматизація розподільних електричних мереж з використанням реклоузерів / О. Д. Козичук // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2018. – № 2. – С. 45–52.
22. ДСТУ EN 60255-1:2014. Реле вимірювальні та обладнання захисту. Частина 1. Загальні вимоги. – Київ : Мінекономрозвитку України, 2014.
23. Андрієнко П. Д. Елементи та функціональні вузли систем автоматики : навч. посібник / П. Д. Андрієнко. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2013. – 248 с.
24. Семенюк П. Аналіз мікропроцесорних пристроїв релейного захисту / Ефективне використання енергії: стан і перспективи: збірник наукових праць III Всеукраїнської студентської науково-практичної конференції (9 листопада 2023 року).
25. Schneider Electric. Network Protection & Automation Guide. – Levallois-Perret : Schneider Electric, 2017. – 370 p
26. Васильченко В. І. Основи експлуатації релейного захисту та автоматики : навч. посібник / В. І. Васильченко. – Харків : Компанія Сміт, 2015. – 232 с.
27. Сірий О. А. Оптимізація місць встановлення реклоузерів у розподільчих мережах 10 кВ / О. А. Сірий, В. М. Сулейманов // Вісник Кременчуцького національного університету. – 2019. – Вип. 3 (116). – С. 56–61.
28. Мережа дистанційного керування та контролю, посилання URL: <https://www.trianglemicroworks.com/products/testing-and-configuration-tools/61850->

test-suite-pro-

pages/overview?gad_source=1&gad_campaignid=12026295346&gbraid=0AAAAAD
u9v-fVIB-6B2awm9_TRFTyAV_R&gclid=Cj0KCQiAuvTJBhCwARIsAL6Demh6-
wwJ8PDC4poepPdC7dzPS8S7m7zXll_6WeMjbyaLm2UMB1N57xYaAksBEALw_wc
B

29. ДСТУ EN IEC 81346-1:2022 Промислові системи, установки, обладнання та промислова продукція. Принципи структурування та посилання на позначення.

Частина 1. Основні правила (EN IEC 81346-1:2022, IDT; IEC 81346-1:2022, IDT)

30. ДСТУ EN 60445:2022 Основні положення та правила безпеки щодо інтерфейсу людина-машина, маркування та позначення. Позначання виводів обладнання та кінців провідників (EN 60445:2021, IDT; IEC 60445:2021, IDT)