

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 імітаційного лабораторного стенду оцінки аварійних
режимів мережі 10 кВ на базі мікропроцесорного пристрою REF 615

Виконав: студент 6 курсу, групи ЕТм-61
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

Дідик Н.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник Оробчук Б.Я.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри Коваль В.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2024

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)

« »

2024 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 ДІДИКУ Назарію Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка імітаційного лабораторного стенду оцінки аварійних режимів мережі 10 кВ на базі мікропроцесорного пристрою REF 615

Керівник роботи Оробчук Богдан Ярославович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, місце зв'язку)

Затверджені наказом ректора від « 11 » жовтня 2024 року № 4/7-988

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень, 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Технічна документація на мікропроцесорний пристрій релейного захисту REF 615, керівництво користувача, схеми електричні принципи, 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, поставлені 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 видає	завдання приймає
Охорона праці	Гурик О.Я., к.т.н. , доцент		
Безпека в надзвичайних ситуаціях	Клепчик В.М., ст. викладач		
Нормоконтроль	Коваль В.П., к.т.н. , доцент		

7. Дата видачі завдання жовтень 2024 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)

~~Лілик~~ Н.І.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Оробчук Б.Я.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дідик Н.І. Розробка імітаційного лабораторного стенду оцінки аварійних режимів мережі 10 кВ на базі мікропроцесорного пристрою REF 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, 2024.

Стор. - 83; рис. - 40; табл. - 2; слайдів - 15; джерел – 39

У кваліфікаційній роботі розглянуто теоретичні та практичні питання розробки лабораторного стенду для імітації аварійних режимів в мережі 10 кВ на базі мікропроцесорного пристрою релейного захисту REF 615, зокрема приведено технічний опис областей застосувань і функцій, перераховані функціональні блоки, логічні схеми, вхідні і вихідні сигнали, задані уставки і технічні дані за виконуваними функціями.

У кваліфікаційній роботі на базі розробленого лабораторного стенду реалізовано віртуальне моделювання аварійних режимів в мережі 10 кВ на базі мікропроцесорного пристрою релейного захисту REF 615, який являє собою спеціальний інтелектуальний електронний пристрій керування та захисту фідерів, призначений для захисту, управління, вимірювання та контролю у розподільчих мережах енергооб'єктів та промислових підприємств, включаючи радіальні, кільцеві мережі, мережі складної конфігурації, мережі з об'єктами розподіленої генерації або без них.

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

ABSTRACT

N. Didyk. Development of simulated laboratory stand for 10 kV network emergency modes assessing based on microprocessor device REF 615. 141 - Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics. Ternopil Ivan Puluj National Technical University. Faculty of Applied Information Technologies and Electrical Engineering. Chair of Electrical Engineering, group ETm-61. – Ternopil: TNTU, 2024.

Page – 83; Illustrations – 40; Tables – 2; Blueprints – 15; Sources – 39

The qualification work considers theoretical and practical issues of developing a laboratory stand for simulating emergency modes in a 10 kV network based on the REF 615 microprocessor relay protection device, in particular, a technical description of the areas of application and functions is provided, functional blocks, logic circuits, input and output signals, setpoints and technical data for the functions performed are listed.

In the qualification work, based on the developed laboratory stand, virtual modeling of emergency modes in a 10 kV network was implemented based on the REF 615 microprocessor relay protection device, which is a special intelligent electronic feeder control and protection device designed for protection, control, measurement and monitoring in distribution networks of energy facilities and industrial enterprises, including radial, ring networks, networks of complex configuration, networks with or without distributed generation facilities.

Key words: laboratory stand, microprocessor device, relay protection, simulation of emergency modes, functional blocks, electrical networks.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	12
1.1 Аналіз застосування пристроїв цифрового релейного захисту	12
1.2 Основні елементи та структура цифрового релейного захисту	14
1.3 Аналіз ринку і вибір пристрою для поставленої в роботі задачі	17
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	44
3.1 Оперативна робота цифрових пристроїв релейного захисту	44
3.2 Живлення мікропроцесорного пристрою	45
3.3 Блокування струмової відсічки	46
3.4 Контроль стану та керування вимикачем	47
3.5 Пристрій резервування відмови вимикача	50
3.6 Опис функціонального блоку логіки відключення	50
3.7 Імітація відключення на шинах автомата кіл ТН	51
3.8 Функція автоматичного повторного включення	52
3.9 Імітація несправності вимикача	55
3.10 Імітація роботи вимикача 10 кВ та заземлюючих ножів	58
3.11 Фізичний ключ керування вимикачем SA	62
3.12 Імітація роботи дугового захисту	63
3.13 Команди на увімкнення та вимкнення вимикача від REF 615	65
3.14 Сигналізація на лабораторному стенді за допомогою вказівних реле	66
3.15 Сигнальна лампа HLW та її роль на лабораторному стенді	68
3.16 Вимірювальні кола	68

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	71
4.1 Заходи безпеки при проведенні лабораторних робіт з стендом	71
4.2 Розрахунок захисного заземлення обладнання лабораторії	73
4.3 Заходи безпеки життєдіяльності в електроустановках	75
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	79

ВСТУП

Актуальність теми. Релейний захист представляє собою комплекс автоматичного обладнання, що використовується для оперативного виявлення та відокремлення від електричної енергетичної системи пошкоджених її елементів в аварійних ситуаціях з метою забезпечення нормального функціонування її непошкодженої частини. Принцип роботи обладнання релейного захисту полягає в безперервній оцінці технічного стану певних контрольованих елементів електроенергетичної системи. Робота релейного захисту передбачає безперервний контроль за станом обладнання електроенергетичної системи та реагує у випадку появи ненормальних режимів та пошкоджень. У разі виникнення пошкодження релейний захист виявляє пошкоджену ділянку та відключає її від електроенергетичної системи за допомогою спеціальних силових вимикачів, що використовуються для розмикання струмів ушкодження. На даний час релейний захист вважається одним із основних видів силової автоматики, що забезпечує нормальну роботу енергосистеми [1].

В енергосистемі України впровадження мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики почалося в кінці 20-го століття, зокрема спочатку для обладнання напругою 6-35 кВ, а пізніше для обладнання напругою 110-220 кВ. Станом на сьогодні релейна техніка все активніше починає освоювати вищий клас напруги, а саме 330–750 кВ. Тому одним із стратегічних напрямків сучасної енергетики є комплексне технічне переведення та реконструкція систем релейного захисту та автоматики із прицілом максимальної автоматизації операцій диспетчерського керування. І вирішення цього завдання можливе тільки при використанні мікропроцесорних пристроїв релейного захисту [2].

Мікропроцесорні пристрої релейного захисту зазвичай будуються на основі мікропроцесорних елементів і є практично основним напрямом розвитку релейного захисту. Крім аварійного відключення енергетичних систем такі пристрої мають додаткові функції, наприклад, можуть здійснювати реєстрацію аварійних ситуацій, а деякі типи пристроїв мають додаткові режими захисту - функцію попереднього відключення синхронних електричних двигунів при втраті стійкості, функцію віддаленого резервування відмов захисту та вимикачів. Варто

зазначити, що згадані функції не можуть бути реалізовані на пристроях релейного захисту на електромеханічного або аналогового типу [3].

До переваг мікропроцесорних пристроїв релейного захисту можна віднести швидкодію, селективність, чутливість та надійність, а до недоліків - висока ціна і неремонтопридатність. Крім того, якщо нема єдиного стандарту на апаратуру, такі пристрої від різних розробників не є взаємозамінними [4].

На теперішньому етапі розвитку електромеханічні реле задовольняють усім необхідним вимогам пристроїв релейного захисту і автоматики, але на сучасних мікропроцесорних пристроях релейного захисту функції релейного захисту уже поєднані з функціями передачі та накопичення даних, обробки інформації, реєстрації аварійних ситуацій і ін. При порівнянні цих багатофункціональних комплексів із простими реле можна говорити про абсолютну перевагу мікропроцесорних захисних реле, хоча тут мова йде про пристрої, які виконують різні функції. У статтях про мікропроцесорні пристрої релейного захисту провідних світових компаній та їх представників в більшості випадків розкрито тільки їх переваги і опубліковано дуже мало статей відомих авторів, які досліджують недоліки переходу на сучасне мікропроцесорне обладнання релейного захисту [5]. Отже, можна впевнено стверджувати, що питання застосування сучасних мікропроцесорних пристроїв релейного захисту є надзвичайно актуальними, відповідно і тема цієї роботи є також актуальною.

Перехід до цифрових пристроїв релейного захисту та автоматики вимагає переосмислення теоретичного і практичного досвіду при роботі з електромеханічними та мікроелектронними пристроями релейного захисту і автоматики. В даному випадку потрібно взяти переваги традиційної школи і прямувати до вдосконалення. Для прикладу можна взяти унікальний досвід України, де було розроблено та впроваджено багато цікавих технічних рішень у протиаварійній автоматичній та релейній захисті, які вже більше століття забезпечують надійне функціонування електричних станцій, мереж і систем [6]. Тому в країні до недавнього часу не зафіксовано значних катастрофічних аварій у порівнянні із зарубіжними енергосистемами, але в галузі розробки нових мікропроцесорних пристроїв релейного захисту є відчувається значне відставання від рівня

зарубіжних розробок. Тому розробка стенду на базі мікропроцесорного пристрою релейного захисту і впровадження його в навчальний процес є доволі актуальною задачею.

Мета і завдання досліджень. Метою кваліфікаційної роботи є розробка лабораторного стенду на базі мікропроцесорного реле REF-615 для вивчення релейного захисту та електроавтоматики у вигляді макету захисту реальної комірки 10 кВ, а також імітації та дослідження аварійних ситуацій та режимів роботи електричної мережі.

Для досягнення мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- проведено аналітичний огляд пристроїв мікропроцесорного релейного захисту за тематикою кваліфікаційної роботи;

- розроблено функціональну схему лабораторного стенду;
- розроблено електричну схему лабораторного стенду;
- розроблено імітацію режиму роботи максимального струмового захисту;
- розроблено імітацію режиму роботи струмової відсічки;
- розроблено імітацію режиму роботи захисту по напрузі;
- розроблено імітацію режиму роботи автоматичного повторного ввімкнення;
- розроблено імітацію режиму аварійних ситуацій для аналізу роботи захисту.

Об'єктом дослідження є лабораторний стенд на базі мікропроцесорного реле REF-615 у вигляді макету захисту реальної комірки 10 кВ.

Предметом дослідження є розширений спектр аварійних ситуацій і режимів роботи електричної мережі, максимально наближених до реальних умов експлуатації.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в запропонованому підході до освоєння та використання технічних даних і логіки роботи пристроїв мікропроцесорного релейного захисту для побудови схем вторинної комутації, розрахунку параметрів спрацьовування основних і резервних захистів обладнання електроенергетичної системи, оптимізація експлуатації та підвищення комфорту обслуговування таких пристроїв за рахунок якісного та кількісного розширення функцій.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в практичному закріпленні знань і тестуванні алгоритмів роботи релейного захисту, що сприяє більш обґрунтованому розумінню принципів функціонування систем захисту та освоєнню роботи з сучасним обладнанням, а це є базовим фактором підготовки фахівців електроенергетичної галузі. Областю можливого практичного застосування є спеціальності електроенергетичного напрямку вищих навчальних закладів України.

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 2024 р. (м. Тернопіль).

Публікації.

За результатами виконаних досліджень опубліковано 1 тезу доповідей «Розробка лабораторного навчального стенду на базі мікропроцесорного реле REF-615». Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей XIII Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11-12 груд-ня 2024) // М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]: ТНТУ, 2024.

Структура роботи.

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

Загальний обсяг текстової частини: 83 сторінки, 2 таблиць, 40 рисунків.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз застосування пристроїв цифрового релейного захисту

В Україні на даний час спостерігається значне використання релейного захисту і автоматики на електромеханічній елементній базі, але новозбудовані та реконструйовані об'єкти електропостачання обладнуються сучасними мікропроцесорними пристроями релейного захисту і автоматики. Перехід на цифрові методи обробки інформації у мікропроцесорних реле дозволив значно підвищити їх експлуатаційні якості. Тут варто відмітити, що принципи побудови релейного захисту і автоматики не змінилися при застосуванні цифрових реле, але розрахунки параметрів їх спрацьовування дещо змінилися [7]. Таким чином, в даний час в електроенергетичних системах можна спостерігати одночасну експлуатацію пристроїв релейного захисту і автоматики на різних елементних базах - електромеханічні реле, шафи та панелі на інтегральних мікросхемах та захисти на мікропроцесорній техніці.

На початку цього століття в експлуатацію почали впроваджувати мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики з одночасними функціями захисту, автоматики, керування та сигналізації. Цей процес отримав розповсюдження по усьому світу, що спричинив поштовх до масового переходу на пристрої цифрового релейного захисту нового покоління. Для виводу на електроенергетичний ринок мікропроцесорних пристроїв релейного захисту виробники і їх торгові представники проводять дуже активну рекламну компанію, спрямовану на розгляд їх переваг, але без обговорення реальних проблем [8].

Якщо використати умовний коефіцієнт *питомого використання* ($K_{\text{ПВ}}$) мікропроцесорних пристроїв релейного захисту, що характеризує рівень функціональної насиченості на одиницю об'єму мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики, то можна стверджувати, що цей показник щорічно зростає, тобто фізичні розміри цих пристроїв залишаються незмінними (або зменшуються), а їх функціональні можливості щораз розширюються. Так як величина коефіцієнта $K_{\text{ПВ}}$ напряму пов'язана з рівнем техніки і технології, то його збільшення в більшості випадків асоціюється з технічним рівнем мікро-

процесорних пристроїв релейного захисту і високими технологічними можливостями виробника цих пристроїв. Коли виникає дискусія щодо корисності цієї тенденції і підвищення за її використання якості мікропроцесорних пристроїв релейного захисту, то можна відповісти ствердно, оскільки збільшення $K_{ПВ}$ забезпечується за рахунок використання прогресивніших матеріалів, елементів і технологій та напряду асоціюється зі збільшенням високого технічного рівня зазначених пристроїв. Але на практиці це питання є набагато складнішим, оскільки прогрес у галузі нових матеріалів та технологій насправді не таким швидким - використовуються будь-які методи для досягнення поставленої мети, тобто йде збільшення $K_{ПВ}$. На даний час спостерігається стала тенденція постійного ускладнення програмного забезпечення, складності інтерфейсу, величезна кількість непотрібних функцій, які суттєво ускладнюють роботу з мікропроцесорними пристроями релейного захисту та підвищують ймовірність виникнення помилки внаслідок роботи обслуговуючого персоналу [9].

Мікропроцесорні пристрої релейного захисту є досить вартісними пристроями, закупівля яких здійснюється у більшості випадків на конкурсній основі. Варто відмітити, що не всі функціональні вузли цих пристроїв мають однакове завантаження, тепловий режим, ймовірність відмов та термін служби. Найбільш схильні до відмови сильно завантажені блоки, наприклад, джерела живлення, плати входів і виходів - електричні пробії або теплове руйнування. А от відмова блоку центрального процесора має зовсім інший характер і пов'язана зазвичай не з фізичними пошкодженнями, а програмними проблемами під час роботи. В більшості випадків майже не виходять з ладу блоки з вхідними трансформаторами струму та напруги, але у різних моделях мікро-процесорних пристроїв релейного захисту від різних виробників показники надійності окремих блоків можуть значно відрізнятися. Але поки що використання функціональних блоків одних мікропроцесорних пристроїв релейного захисту замість таких же за призначенням блоків інших мікропроцесорних пристроїв релейного захисту повністю виключається. В практиці були випадки, коли повна заміна мікропроцесорного пристрою релейного захисту одного виробника на мікропроцесорний пристрій

релейного захисту іншого виробника на діючій підстанції викликав складності у зв'язку з великою різноманітністю форм і розмірів цих пристроїв [10].

Варто також відмітити, що друковані плати мікропроцесорних пристроїв релейного захисту все частіше виконуються методом поверхневого монтажу із застосуванням мікрокомпонентів і компанії-виробники ніколи не надають споживачеві докладних принципових схем таких плат, то усунення несправностей цих плат та їх ремонт є доволі трудомістким процесом. В деяких випадках доводиться відмовлятися від експлуатації таких плати, незважаючи на велику кількість великих дискретних компонентів звичайного монтажу та її вартість. Спостерігається тенденція збільшення щільності монтажу не тільки на друкованих платах мікропроцесорних пристроїв релейного захисту властива але і також на друкованих платах на базі стандартних дискретних елементів. Коли розглядають джерела живлення, що працюють з потенційно високими напругами та струмами, то враховують, що такий монтаж передбачає небезпечне розташування різнопотенційних друкованих провідників на платі, а це може спровокувати процес електричного пробоя запиленої друкованої плати при надмірній вологості повітря. Необхідно також врахувати, що такому при щільному монтажі виникають проблеми теплового режиму роботи електронних компонентів та значно скорочується їх термін використання. Пошук несправностей та ремонт друкованих плат при такому щільному монтажі є доволі складним, вартісним і довготривалим процесом [11].

1.2 Основні елементи та структура цифрового релейного захисту

Останнім часом спостерігається широке застосування мікропроцесорної техніки у релейному захисті, що обумовлено її перевагами у порівнянні з електромеханічними та електронними пристроями релейного захисту.

Вхідна інформація цифрового релейного захисту може мати наступні складові:

- аналогові сигнали з характеристикою контрольованих величин енергосистеми;

- вхідна дискретна інформація від комутаційних апаратів, пристроїв релейного захисту та обслуговуючого персоналу;

- цифрова інформація від пристроїв релейного захисту (поточні значення змінного струму, логічні сигнали) по каналу цифрових комунікаційних інтерфейсів;

- керування налаштуваннями та параметрами цифрового релейного захисту (обслуговуючий персонал або системи керування через комунікаційний інтерфейс).

Вихідна інформація цифрового релейного захисту може мати наступні складові:

- вихідна дискретна інформація (логічні сигнали, що поступають на інші захисти та відключення вимикачів);

- цифрова інформація до інших пристроїв (поточні значення змінного струму, логічні сигнали) у вигляді цифрових комунікаційних інтерфейсів;

- повідомлення різних видів (логічні вихідні сигнали та цифрові дані), зокрема візуальне спостереження, виміряні захистом аналогові величини струмів, напруг, потужності в різних режимах роботи;

До основних елементів цифрового релейного захисту відносяться наступні функціональні блоки [12]:

- аналогові входи змінного струму (ввід сигналів від вимірювальних трансформаторів струму та напруги);

- електронні елементи для цифрової обробки сигналів (перетворювачі та підсилювачі, мікропроцесорний блок);

- дискретні входи (вивід логічної інформації для прийняття рішень);

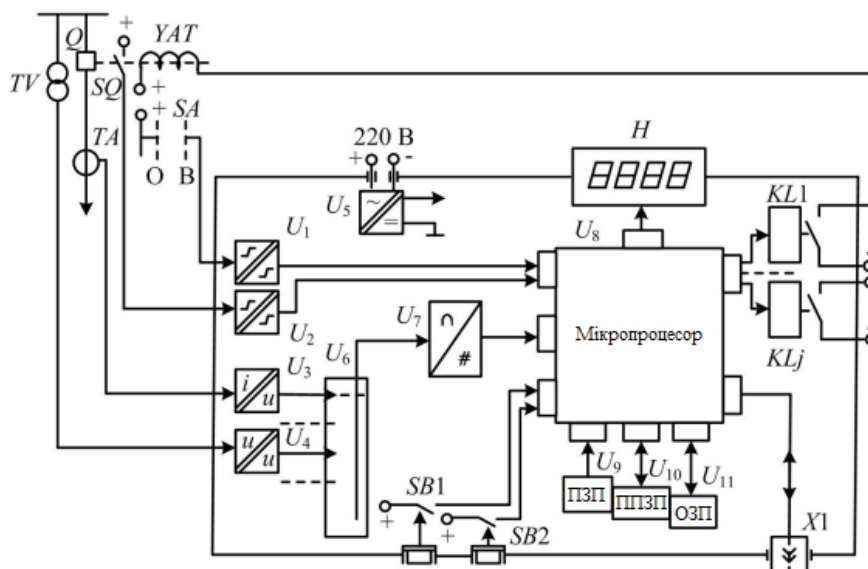
- дискретні виходи (для управління та сигналізації);

- функціональна клавіатура управління (ввід керуючої інформації, ввід/вивід з дії окремих функцій, ввід команд керування комутаційними елементами приєднання і ін.);

- дисплей для отримання повідомлень захисту і як допоміжний засіб для всіх операцій з клавіатури;

- інтерфейс обслуговування (послідовний порт на лицьовій панелі захисту) - забезпечує зв'язок між захистом і комп'ютером;
- системний інтерфейс для забезпечення зв'язку захисту із системою контролю та управління;
- функціональний інтерфейс для забезпечення оперативного обміну інформацією про дії окремих функцій захисту, повідомлення та стан контактів комутаційних апаратів з пристроєм захисту на іншому кінці об'єкта, що підлягає захисту.

Цифрові пристрої релейного захисту різного призначення в більшості випадків мають багато спільних функціоналів, а їх структурні схеми є дуже схожими і подібними до схеми, яка приведена на рис. 1.1.



1.1 - Структурна схема цифрового пристрою релейного захисту.

Центральним вузлом такого цифрового пристрою є мікропроцесор, який через пристрої вводу-виводу здійснює обмін інформацією з своїми периферійними вузлами. При допомозі цих додаткових вузлів виконується зв'язок мікропроцесора із зовнішнім середовищем, зокрема з давачами вихідної інформації, з об'єктом управління, з оператором і ін. Тут варто відмітити, що в реальних пристроях релейного захисту в більшості випадків використовується кілька мікропроцесорів. Кожен з таких мікропроцесорів може виконувати вирішення окремого фрагмента спільної задачі з метою забезпечення високої швидкодії. Наприклад, у складних пристроях мікропроцесорних пристроях

релейного захисту використовується до 10 мікропроцесорів, що здійснюють паралельну роботу [13].

Обов'язковими вузлами цифрового пристрою релейного захисту та автоматики є вхідні (U_1 – U_4) та вихідні (KL_1 – KL_j) перетворювачі сигналів, блок аналого-цифрового перетворення (U_6 , U_7), кнопки керування та вводу інформації від оператора (SB_1 , SB_2), дисплей (H) для виводу інформації та блок живлення (U_5). Сучасні цифрові пристрої релейного захисту в більшості випадків комплектуються також комунікаційним портом зв'язку з іншими пристроями (X_1).

1.3 Аналіз ринку і вибір пристрою для поставленої в роботі задачі

Інтенсивний розвиток ринку цифрової техніки викликав широке її розповсюдження на всіх рівні автоматизації енергетичних об'єктів в енергетиці і інших галузях промисловості. Зокрема, пристрої релейного захисту і автоматики на традиційній елементній базі на даний час уже не можуть забезпечити вирішення багатьох актуальних експлуатаційних та технічних проблем.

Мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики увійшли в практику на світовій практиці на початку цього століття і почали поступово витісняти електромеханічні пристрої та електронну аналогову техніку (рис.1.2). Хоча перехід на цифрові принципи обробки інформації в релейного захисту і автоматики не викликав появи нових принципів побудови захисту, але він сформував оптимальну структуру побудови апаратної частини сучасних цифрових пристроїв та значно підвищив експлуатаційні параметри пристроїв релейного захисту і автоматики [14].

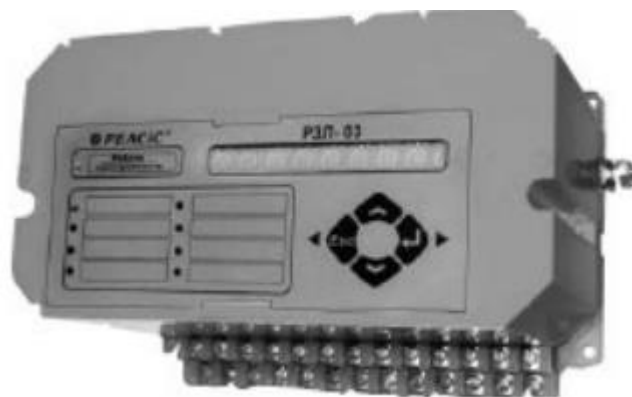


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд мікропроцесорного пристрою релейного захисту і автоматики

Більшість фахівців галузі вважають, що перехід на мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики є неминучим [15]. На першому етапі потрібно виконати заміну фізично зношеної апаратури, яку вже не підлягає експлуатації, на традиційну апаратуру, далі необхідно вирівняти стан енергетичних систем і на завершальному етапі можна здійснити плановий перехід на релейний захист на мікропроцесорній базі. Варто відмітити, що кожен енергетичний об'єкт має свої особливості і при розв'язку задачі пере-оснащення релейного захисту і автоматики нема однозначного стандартного підходу. Практичний досвід свідчить, що до цього процесу необхідно підходити досить виважено.

На даний час мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики формують основний напрям розвитку релейного захисту. Крім аварійного відключення енергетичних систем – своєї основної функції - мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики володіють додатковими функціями у порівнянні з пристроями релейного захисту інших типів при здійсненні процесу реєстрації аварійних ситуацій. У деяких типах пристроїв передбачено додаткові функції захисту, зокрема, випереджального відключення синхронних електричних двигунів при втраті стійкості, далекого резервування відмов захисту та вимикачів. Варто зазначити, що згадані функції не можна реалізувати на електромеханічних або аналогових пристроях релейного захисту. Порівняння переваг і недоліків мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики приведено в табл. 1.1.

Загальновідомо, що мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики додатково потребують операцій конфігурування, ранжирування та параметризації. Отже, до заміни електромеханічних пристроїв захисту і автоматики на мікропроцесорні треба підходити дуже виважено, здійснювати адаптацію цифрової апаратури до суміжних систем на підприємстві. Наприклад, для теплоенергоцентралі – це є електромагнітна сумісність. Необхідно також забезпечити надійне функціонування мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики під впливом високих полів кабельних трас. Також потрібно провести визначення ступеня надійності нових схемних рішень, оскільки кожна

нова система має визначений період напрацювання на відмову, які можна перевірити тільки у випадку аварійної ситуації, коли вона має спрацьовувати. Відповідно, заміну пристроїв релейного захисту і автоматики треба здійснювати поступово, враховуючи досвід її експлуатації [16].

Таблиця 1.1 - Порівняння переваг і недоліків мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики

Переваги	Недоліки
Зменшення експлуатаційних витрат через впровадження самодіагностики, автореєстрації режимів та подій.	Висока ціна пристрою у порівнянні з електромеханічними, що в умовах українського ринку відіграє істотну роль
Зменшення часу на усунення причин аварій за рахунок реєстрації та запису	Перехід на цифрові пристрої потребує перенавчання технічного персоналу
Можливість діагностики пристроїв релейного захисту і автоматики, а також первинного устаткування.	При включенні живлення система на мікропроцесорному пристрої вимагає часу на перезавантаження
Значне зниження енергоспоживання в колах оперативного постійного струму та напруги	
Скорочення витрат на впровадження, малі габарити та малі витрати на апаратну частину	
Кращий контроль за станом обладнання та роботою пристроїв релейного захисту і автоматики	

Незважаючи на високу вартість мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики, їх застосування дає значний економічний ефект за рахунок зниження експлуатаційних витрат та збитків від недовідпуску електричної енергії. Тому їх інтеграція в автоматизовані системи управління електричних станцій та підстанцій дозволяє отримати суттєвий ефекту і в економічному плані, і в організації роботи технічного персоналу підприємства [17].

На ринку цифрового релейного захисту найбільш розповсюджена продукція таких фірм як «АВВ» (Швеція - Швейцарія), «Сіменс» (Німеччина), «Шнайдер електрик» (Франція), які адаптували пристрої до умов українських енергетичних систем, а також перші вітчизняні розробки від ВО «Київприлад», конструкторським бюро «Реле й автоматики», ТОВ "Енергомашвин" та підприємства «Хартрон-Інкор», ТОВ «РЗА СИСТЕМЗ». Досвід застосування українсь-

ких захистів показує, що вони також можуть забезпечують відносно високу надійність роботи та повністю відповідають встановленим вимогам енергетиків. Наприклад, для електромереж напругою 6 - 110 кВ пристрої вітчизняних виробників уже конкурують із закордонними розробками, а для більш високих класів напруги розробляються тільки окремі пристрої. Тому повна система релейного захисту й автоматики електричних підстанцій напругою 220 - 750 кВ на даний час може забезпечуватися тільки закордонними аналогами.

Продукція фірми «РЗА СИСТЕМЗ» представлена мікропроцесорними пристроями релейного захисту та автоматики серії РС83 для використання на приєднаннях 6 – 110 кВ підстанцій та розподільчих пунктів (рис. 1.3). Ця серія забезпечує комплексне виконання функцій релейного захисту та автоматики розподільчих мереж без додаткового обладнання. Пристрої зазначеної серії напрямку використовуються для приєднань на підстанціях потужністю від 6 до 110 кіловат та в розподільчих пунктах. Завдяки використанню сучасних систем та новітніх розробок забезпечується комплексна та якісна протекційна дія у розподільчих електричних мережах без використання додаткового обладнання та апаратури.



Рисунок 1.3 – Загальний вигляд пристрою захисту та автоматики ліній і інших приєднань 6–35 кВ [18]

Цифровий захист на базі мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики ТРУ220 та ТРУ420 пропонує компанія СЕА виробництва фірми *Efases* (Португалія), які використовуються для захисту ліній середньої, високої та надвисокої напруги, а також автоматизації розподілу електроенергії (рис. 1.4)



Рисунок 1.4 – Загальний вигляд мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики TPU220 та TPU420 [19]

Продукція цієї компанії дозволяє забезпечити надійний захист електричних ліній середнього, високого та надвисокого класу напруги, а також забезпечує автоматизацію розподілу електричної енергії. Зазначене обладнання використовується для великої номенклатури застосувань в релейному захисті - від електричних станцій до електроенергетичних об'єктів промислових підприємств.

Компанія «Шнайдер електрик» пропонує на ринку нові сучасні пристрої мікропроцесорного захисту Sepam серій 20, 40, 80 торгової марки MerlinGerin, які використовуються для захисту електрообладнання напругою 6 – 35 кВ та трансформаторів напругою 6–220 кВ від коротких замикань. Крім функції захисту передбачено декілька додаткових функцій, зокрема, вимірювання параметрів електромережі, управління електрообладнанням (рис. 1.5).

Мікропроцесорні пристрої Sepam серії 40 в більшості випадків використовуються для захисту електрообладнання великого об'єму захисту, тобто одночасно за струмом та напругою, або коли виникає потреба побудови складної логіки роботи. За допомогою пристроїв цієї серії можна здійснювати технічний облік електроенергії.



Рисунок 1.5 – Лінійка мікропроцесорного захисту серії Seram 20,40,80 [20]

Фірма «Сіменс» пропонує для промислових споживачів пристрої захисту від перевантаження по струму та фідеру Siemens Reyrolle 5 7SR51, який охоплює широкий спектр функцій захисту та стандарт зв'язку IEC 61850 Ethernet. Можна вважати, що цей пристрій розроблено для електричних мереж майбутнього з покращеним зв'язком і кібербезпекою при збереженні зручного інтерфейсу і прости керування приладом (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Лінійка мікропроцесорного захисту від фірми «Сіменс» [21]

Для додаткової мінімізації варіантів пристрою джерело живлення та двійкові входи передбачає охоплення повного робочого діапазону із легкими налаштуваннями порогових значень двійкових входів. Інформативний РК-дисплей, тактильні кнопки та програмовані світлодіоди забезпечують зручний інтерфейс спілкування з пристроєм, а релейний елемент можна легко замінити на інший при виході його з ладу.

Мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики від фірми «Сіменс» роблять захист, контроль, моніторинг і вимірювання в електромережах важливим елементом в їх управлінні, підвищенні надійності, стійкості та безпеки обслуговуючого персоналу.

Виробниче об'єднання «Київприлад» пропонує на ринку свій пристрій МРЗС-05-05, який використовується в електричних мережах для контролю, захисту та керування електричними приєднаннями напругою 6-35 кВ (рис. 1.7)



Рисунок 1.7 – Пристрій захисту приєднань 6-35 кВ МРЗС-05 від ВО «Київприлад» [22]

Пристрій МРЗС-05-05 від українського виробника представляє собою мікропроцесорний пристрій релейного захисту і автоматики з наступними функціями:

- з триступеневим максимальним струмовим захистом із блокуванням (або без блокування) за напругою;
- із захистом від замикань на землю за струмом нульової послідовності;
- із захистом максимальної напруги;

- із двоступеневим захистом мінімальної напруги з контролем струму, функцією вимкнення блокування захисту за рівнем 0,25 В та функцією об'єднання пускових органів напруги через логічні елементи І або АБО. Доступне дворазове або одноразове автоматичне повторне увімкнення;

- з резервуванням відмови вимикача;

- з автоматичним частотним розвантаженням;

- з автоматичним прискорення максимальним струмовим захистом у разі увімкнення вимикача блокування після спрацювання першого ступеня максимального струмового захисту.

Мікропроцесорний пристрій МРЗС-05-05 дозволяє контролювати напругу, струми, частоту, активну та реактивну потужності, максимальний струм в пошкодженій фазі, мінімальну напругу в пошкодженій фазі.

Ще одним провідним вітчизняним багатoproфільним виробником релейної техніки під торговою маркою РЕЛСІС є ТОВ «НВП «РЕЛСІС». Це підприємство є сучасним українським виробником надійних промислових електрон-них засобів автоматизації для релейної техніки систем захисту і автоматики в енергетичній галузі.

ТОВ «НВП «РЕЛСІС» має досить широку лінійку мікропроцесорних пристроїв релейної техніки, а саме пристрої і термінали релейного захисту та автоматики для енергетичних об'єктів на напругу 6-35-110 кВ: прилади частотної автоматики, прилади контролю справності трансформаторів напруги та дешунтування з автоматичним диспетчерським управлінням (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики для об'єктів енергетики 6-35-110 кВ [23]

Комплектні пристрої під торговою маркою РЕЛСіС використовуються в обленерго, районних мережах та промислових підприємствах. Ці пристрої встановлюються кінцевому споживачу у вигляді готового рішення під «ключ», завдяки чому отримали велику популярність, приймаючи до уваги якісний монтаж, швидкість заміни застарілого обладнання, а також просту конструкцію схеми та зручність обслуговування.

Науково-виробниче підприємство ХАРТРОН-ІНКОР на ринку України пропонує уніфіковані системи релейного захисту і автоматизації енергооб'єктів різних класів напруги, зокрема, уніфікований мікропроцесорний модуль релейного захисту та автоматики «Діамант», які знайшов широке застосування в мережах класу напруги від 6 до 750 кВ (рис. 1.9).



Рисунок 1.9 – Пристрій мікропроцесорні релейного захисту та автоматики «Діамант» [24]

На базі цього мікропроцесорного модуля розроблено системи протиаварійної автоматики для енергетики, моніторингу енергетичних об'єктів, які мають такі наступні складові:

- пристрої автоматики для ліквідації асинхронного режиму;
- пристрої для фіксації активної потужності;
- пристрої автоматики від підвищення напруги;
- пристрої для фіксації вимкнення/ввімкнення лінії;
- пристрої автоматичного дозування впливів;

- пристрої автоматизованої системи постійного контролю за станом комутаційних апаратів розподільних пристроїв високої напруги та їх керуванням.

Також на ринку України широко представлений спеціальне інтелектуальне електронний пристрій управління і захисту фідерів REF615, який використовується для захисту, управління, вимірювання та контролю в розподільних мережах енергетичних об'єктів і промислових підприємств (рис. 1.10). Пристрій може працювати в радіальних і кільцевих мережах, а також мережах складної конфігурації та мережах з об'єктами розподіленої генерації (або без них).



Рисунок 1.10 – Інтелектуальний електронний пристрій управління і захисту фідерів REF615 [25]

Інтелектуальний електронний пристрій управління і захисту фідерів REF615 представляє собою спеціальний пристрій захисту фідера і використовується в якості основного максимального струмового захисту, а також захисту під час виникнення замикань на землю повітряних (або кабельних) ліній в електричних мережах з ізольованою нейтраллю. Також пристрій може працювати в мережах з нейтраллю, що заземлена через резистор та з компенсованою або ефективно заземленою нейтраллю - це залежить від того, яка використовується стандартна конфігурація. Цей пристрій включає в себе 12 стандартних конфігурацій, дві з яких володіють максимальною функціональністю та можливістю налаштування до заявлених вимог замовника. Одна з цих конфігурацій призначена для роботи з

давачами, інша – використовується з стандартними вимірювальними трансформаторами.

Також варто відмітити наявність широкого діапазону захистів від зами-кань на землю. Ці захисти у свою чергу доповнені функцією мультичастотного захисту, що базується на контролі комплексної провідності з метою підвищення чутливості та селективності. Згаданий захист від режимів замикання на землю, який поєднує в собі надійність і чутливість, можна використати для захисту від різних типів замикань - довоготривалих, перехідних та перехресних.

Крім того, особливої уваги в інтелектуальному електронному пристрої управління і захисту фідерів REF615 заслуговує те, що він підтримує найсучасніший стандарт МЕК 61850 для зв'язку і взаємодії пристроїв автоматизації на підстанціях, зокрема, МЕК 61850-9-2 LE новій редакції з доповненими функціями. До переваг пристрою REF615 можна також віднести підтримку 2-а протоколів паралельного резервування:

- протокол PRP;
- протокол HSR (безшовного резервування високої доступності).

Інтелектуальний електронний пристрій управління і захисту фідерів REF615 передбачає підтримку протоколів DNP3, IEC 60870-5-103 і Modbus®, а при використанні перетворювача протоколів SPA-ZC 302 можлива підтримка протоколу Profibus DPV1.

В результаті проведеного в цьому розділі аналітичного дослідження мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики та порівняння їх технічних характеристик, переваг та недоліків, було прийнято рішення за осно-ву розробки лабораторного навчального прийняти інтелектуальний електрон-ний пристрій управління і захисту фідерів REF615.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Призначення лабораторного стенду

Загальновідомо, що в електричних енергетичних системах на лінії електропередачі припадає найбільше число пошкоджень. Зокрема, міжфазні, двофазні короткі замикання на землю та однофазні короткі замикання у мережах із ефективно заземленою нейтраллю мають високі рівні струмів, а це викликає додаткові механічні навантаження на електричну лінію і, відповідно до перегрівання провідників. Такі явища можуть викликати фізичні пошкодження лінії та вихід її з роботи, а також супроводжуються пониженням напруги на підстанціях, тобто порушують динаміку стійкості енергетичної системи. Тому у випадку виникнення згаданих пошкоджень діючі захисти повинні реагувати з найменшою витримкою часу на вимкнення пошкодженої лінії.

Нестабілізовані та стабілізовані коливання виникають під час значних збурень в енергетичній системі, що викликають порушення стійкості режиму її роботи. Такі режими можуть виникати після вимкнення великих генеруючих потужностей, зовнішніх коротких замикань, увімкнення значного навантаження та супроводжуються періодичними коливаннями параметрів режиму з вагомими амплітудами. Усунення зазначених режимів здійснюється спеціальними пристроями автоматики. У цих режимах пристрої релейних захистів не повинні працювати та не вимикати лінії живлення. Тому налаштування правильної роботи системи релейного захисту є однією із головних задач захисту роботи енергетичної системи [26].

Для вирішення цієї задачі в умовах навчального процесу було розроблено лабораторний стенд для моделювання роботи комірки 10 кВ, зокрема, її релейного захисту та електроавтоматики. Основна мета цього навчального стенду — надати студентам можливість практичного вивчення функцій і алгоритмів роботи систем релейного захисту в умовах, максимально наближених до реальних. Стенд дозволяє імітувати різні режими роботи комірки, діагностувати її стан, перевіряти налаштування реле, тестувати спрацювання захистів та аналізувати їхню поведінку в аварійних ситуаціях.

2.2 Концепція створення лабораторного стенду

Ідея створення лабораторного стенду виникла із-за необхідності забезпечити комплексне практичне навчання, яке не лише ілюструє теоретичні аспекти, а й дозволяє повністю відтворити структуру та функції реальної комірки підстанції. Стенд побудовано з використанням сучасних компонентів: інтелектуального електронного пристрою на базі REF 615 від фірми «ABB», сигнальних ламп, перемикачів, накладок і вказівних реле. Кожен елемент імітує функціонал реального обладнання, включаючи механізми блокування, індикації, управління та аварійної сигналізації.

Ця концепція забезпечує гнучкість у використанні стенда, дозволяючи студентам експериментувати з різними конфігураціями захисту та автоматизації.

2.3 Розробка каркасу лабораторного стенду

Каркас лабораторного стенда виготовлено з металевої панелі, що забезпечує його міцність і стабільність. Основу конструкції становлять металеві ніжки, виконані з кутників товщиною 3 мм, які надійно підтримують стенд і гарантують його стійкість під час експлуатації. Поверхні металевих елементів покриті порошковою фарбою, яка забезпечує захист від корозії, механічних пошкоджень та надає конструкції естетичний вигляд (рис. 2.1).

Каркас передбачає розміщення різноманітних компонентів стенда, таких як клемники, кнопки, сигнальні лампи, перемикачі, а також мнемосхему, що інтегрована в передню частину конструкції для зручності доступу та роботи.

На рис. 2.1 приведено основу стенда — його металевий каркас з підготовленими технічними отворами для монтажу різних компонентів.



Рисунок 2.1 – Вигляд каркасу лабораторного стенду

2.4 Вибір компонентів для лабораторного стенду

Реле типу РП-9 призначене для використання в колах змінного струму у якості допоміжного реле (рис. 2.2). РП-9 представляє собою поляризоване реле, в якому спрацьовування якоря відбувається при подачі живлення на котушку на певний напівперіод напруги в залежності від напрямку. Реле цього типу використовується для імітації реального силового вимикача на лабораторному стенді, що дає змогу моделювати процеси ввімкнення та вимкнення в умовах реальної підстанції 10 кВ.

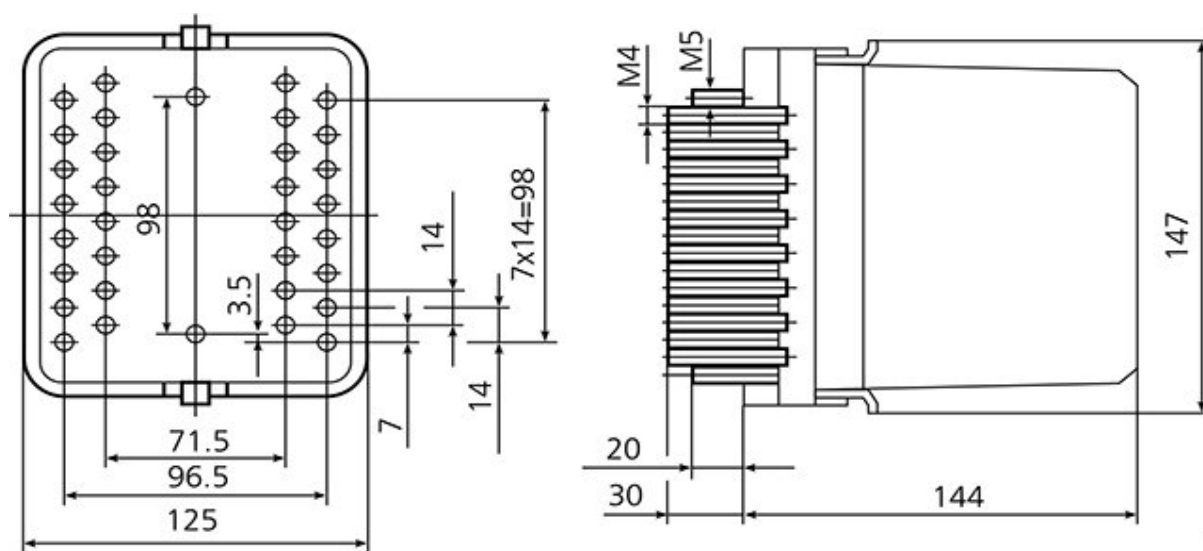


Рисунок 2.2 - Габаритні розміри реле РП-9

Реле РП-9 має наступні технічні характеристики:

- напруга живлення - 100, 110, 220 В (змінний струм);
- число контактів - 7 нормально замкнутих, 7 нормально розімкнутих;
- комутаційна здатність - до 50 ВА для постійного струму та до 450 ВА для змінного струму;
- струм на замкнених контактах - до 5 А;
- приєднання провідників – заднє;
- ступінь захисту - IP40;
- вага - 2 кг.

Для імітації подій та вводу/виводу накладок на лабораторному стенді були використовуються кнопки та перемикачі (рис. 2.3). Ці елементи дозволяють моделювати різні сценарії роботи релейного захисту, наприклад, блокування функцій або активація захисту. Зазначені елементи дають можливість студентам під час проведення лабораторних робіт взаємодіяти з віртуальною енергетичною системою, відтворюючи умови реальних аварійних ситуацій та проводячи тестування різних режимів її роботи.

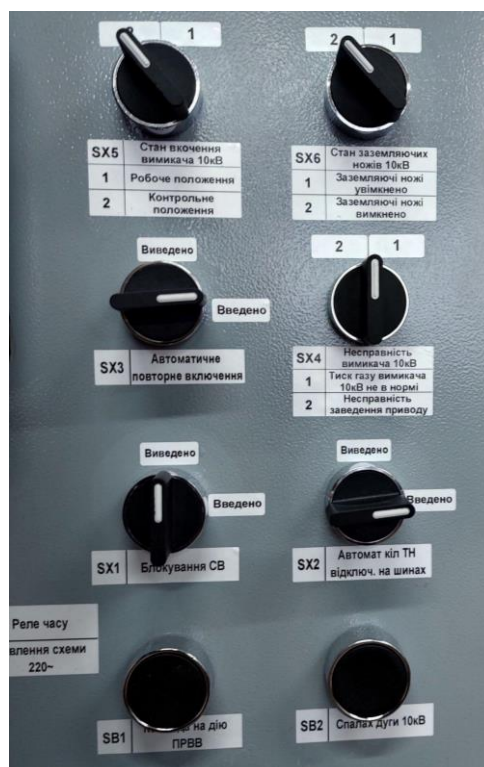


Рисунок 2.3 – Кнопки та перемикачі для імітації робочих подій

Для накладок SX1, SX2 та SX3 на лабораторному стенді було використано двопозиційні перемикачі XB2-BD21 (рис. 2.4). Ці перемикачі дозволяють здійснювати комутацію та зміну режимів роботи різних функцій стенда, таких як блокування струмової відсічки, імітація зникнення напруги на вимірювальних входах та вводеу/виводу функції АПВ. Вони ефективно забезпечують взаємодію з користувачем під час тестування та моделювання аварійних ситуацій.

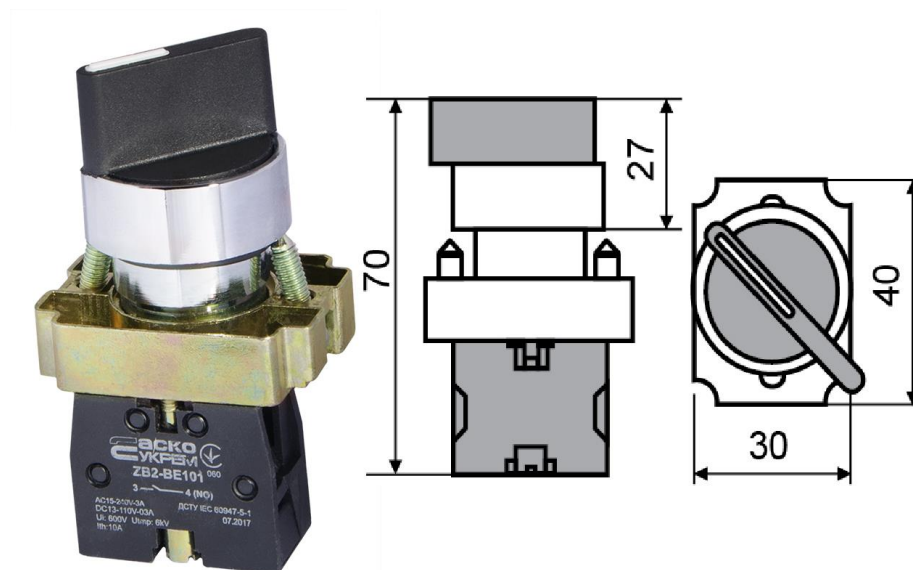


Рисунок 2.4 – Двопозиційний перемикача типу XB2-BD21

Функції кнопок SB1 та SB2 були виконані за допомогою перемикачів XB2, але в вигляді кнопок без фіксації (рис. 2.3). Це дозволяє короткочасно подавати сигнал для імітації аварійних подій, таких як аварійне відключення або спалах дуги. Завдяки такому підходу забезпечується точне моделювання аварійних ситуацій, що дозволяє студентам практично ознайомитись з роботою дугового захисту та тестувати реакцію системи на різні сценарії.

Функції накладки SX4 реалізовані за допомогою трипозиційних перемикачів типу XB2, оснащених двома нормально закритими контактами (рис. 2.3). Це дозволяє накладці SX4 виконувати роль елемента, який у разі несправності вимикача 10 кВ розриває сигнал, що подається на дискретний вхід мікропроцесорного реле.

Накладки SX5 і SX6 виконані аналогічно, але оснащені двома нормально відкритими контактами (рис. 2.3). Вони формують сигнал і передають його на

дискретний вхід мікропроцесорного реле. Таке рішення забезпечує коректну імітацію роботи системи релейного захисту у разі подій або аварій.

На лабораторному стенді для індикації режимів роботи обладнання використовуються сигнальні лампи типу AD-22 22DS трьох кольорів (рис. 2.3): зеленого (HLG), червоного (HLR) та білого (HLW). Лампа зеленого кольору HLG сигналізує про стан вимикача "вимкнено", лампа червоного кольору HLR — про стан «ввімкнено». Лампа білого кольору HLW сигналізує, що вказівні реле (КН1, КН2, КН3) не скинуті, тобто присутня наявність несправності або відсутність підтвердження стану.



Рисунок 2.5 – Сигнальна лампа типу AD-22 22DS

Сигнальні лампи забезпечують візуальне сповіщення про стан системи, спрощуючи моніторинг роботи обладнання. Вони мають високу яскравість, компактність та тривалий ресурс роботи, що ідеально підходить для умов лабораторних занять. Завдяки кольоровій індикації студенти швидко навчаються розпізнавати стани та події, характерні для систем релейного захисту.

Використання трьох кольорів дозволяє уникнути неоднозначностей у розумінні стану стенда, сприяючи глибшому засвоєнню матеріалу і відпрацюванню практичних навичок роботи з електротехнічними пристроями.

На лабораторному стенді використовуються вказівні реле КН1, КН2, КН3, які реалізовані на базі реле типу РЕУ-11 (рис. 2.6). Ці реле призначені для сигналізації аварійного стану в колах постійного струму напругою до 220 В або

змінного струму напругою до 380 В (50 Гц) і до 440 В (60 Гц). Вони застосовуються в автоматичних системах для індикації спрацювання схем захисту й автоматики.

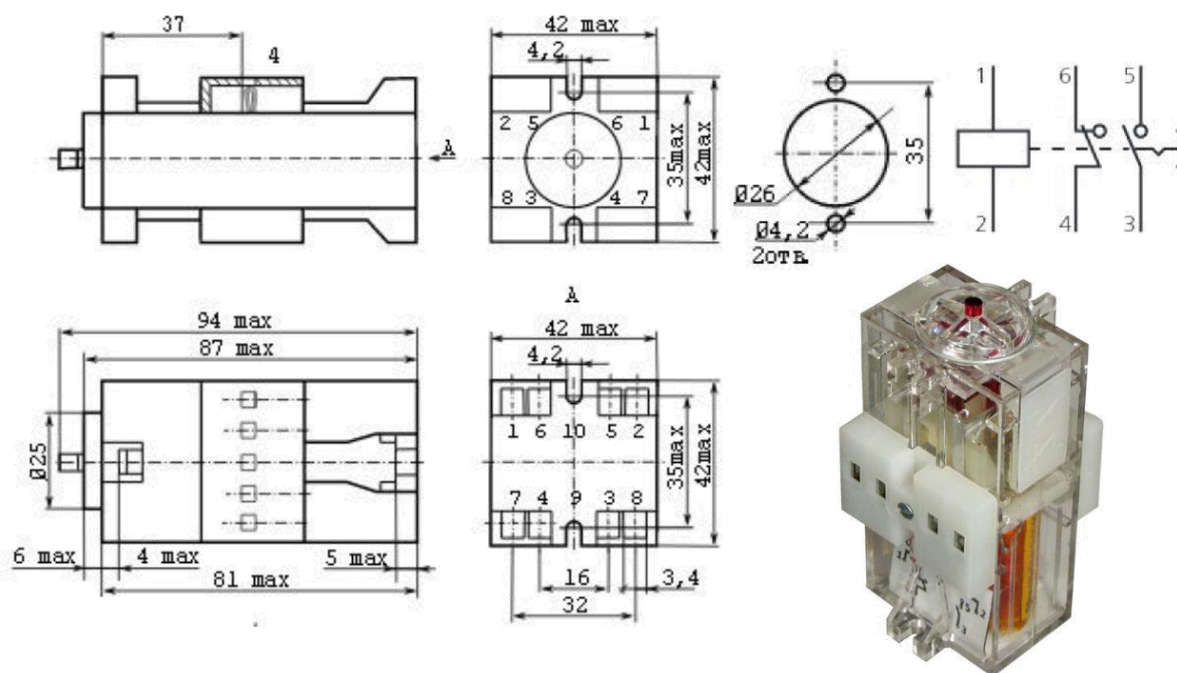


Рисунок 2.6 – Вказівні реле

Реле РЕУ-11 має два стабільних стани — «заведене» і «спрацьоване», що забезпечує чітке візуальне визначення кожного стану (рис. 2.7). Заведення після спрацювання здійснюється вручну. Реле також може контролювати напругу або струм, що підвищує його функціональність для навчального процесу.

У лабораторному стенді реле РЕУ-11 керується змінною напругою 220 В. Для функціонування використовуються його нормально закритий та нормально відкритий контакти. Нормально закритий контакт використовується для розриву кола живлення своєї котушки реле при виникненні аварійного сигналу, а нормально відкритий — для подачі сигналу для індикації при переході реле в спрацьований стан. Це дозволяє ефективно бачити, які відбувалися аварійні події та процеси в схемах захисту й автоматики стенду.



Рисунок 2.7 – Панель стану вказівних реле

На лабораторному стенді використовуються вказівники стану **HG1**, **HG2** та **HG3** (рис. 2.8). Вказівник **HG1** сигналізує про стан увімкнення вимикача 10 кВ, **HG2** вказує на стан вимикача, а **HG3** показує стан заземлюючих ножів 10 кВ. Разом ці вказівники стану формують мнемосхему, яка наочно відображає поточний стан обладнання, що дозволяє здійснювати моніторинг його роботи та своєчасно реагувати на зміни (рис. 2.9).

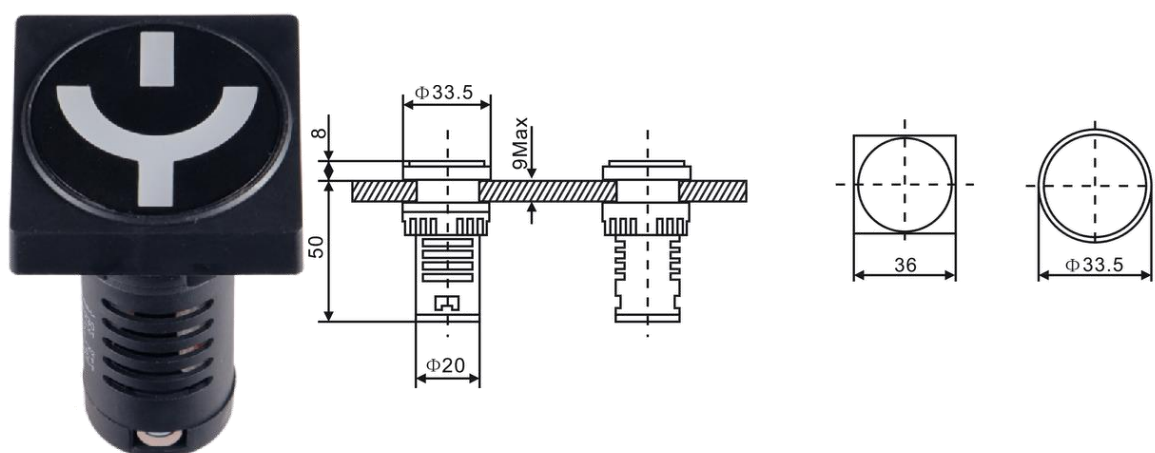


Рисунок 2.7 – Вказівник стану обладнання PK22-WPW

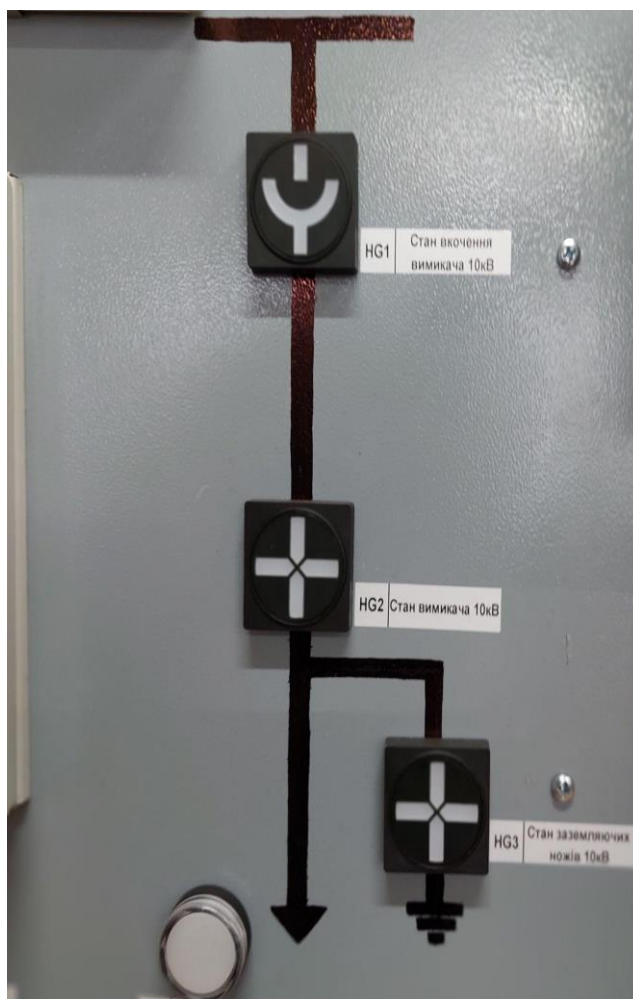


Рисунок 2.9 – Мнемосхема поточного стану обладнання

Вказівники типу **PK22-WPW**, які використовуються на реальних підстанціях для відображення положення контрольованого елемента або його руху встановлені на лабораторному стенді. Вказівники вказують стан за допомогою символу контакту перемикача, підсвіченого червоними або зеленими світлодіодами. Живлення підключається таким чином:

- **X0** — загальний контакт (заземлення);
- **X1** — червоне підсвічування (подача напруги);
- **X2** — зелене підсвічування (подача напруги).

Це дозволяє наочно відображати стан системи або елемента.

Для імітації роботи другого захисту, а саме для імітації випадку спалаху дуги 10 кВ, було використано лінійний світильник Т5 потужністю 5 Вт (рис. 2.10). У корпус світильника було введено оптоволокну, яке підключено до входу світлового датчика мікропроцесорного реле. Це дозволяє зімітувати роботу

другого захисту при натисканні кнопки SB1 (рис. 2.3). Подається живлення на лампу і через оптоволокну передається світловий сигнал до пристрою.



Рисунок 2.10 – Лінійний світильник для імітації спалаху дуги 10 кВ

Також було Розроблено імітацію підзаведення вимикача 10 кВ за допомогою низькообертового електродвигуна ТУJ50-8A7 (рис. 2.11). Після здійснення операції увімкнення через контакти реле часу КТ подається живлення на електродвигун і здійснюється візуалізація підзаведення вимикача.



Рисунок 2.11 – Низькообертовий електродвигун ТУJ50-8A7

На лабораторному стенді використовується реле часу (КТ) ВЛ-162, яке регулює час підзаведення вимикача 10 кВ (рис. 2.12). Це реле призначене для виконання функцій затримки на ввімкнення або затримки на вимкнення після зникнення напруги живлення. Завдяки своїй універсальності воно підтримує живлення від джерел змінного або постійного струму з напругою 12-240 В.

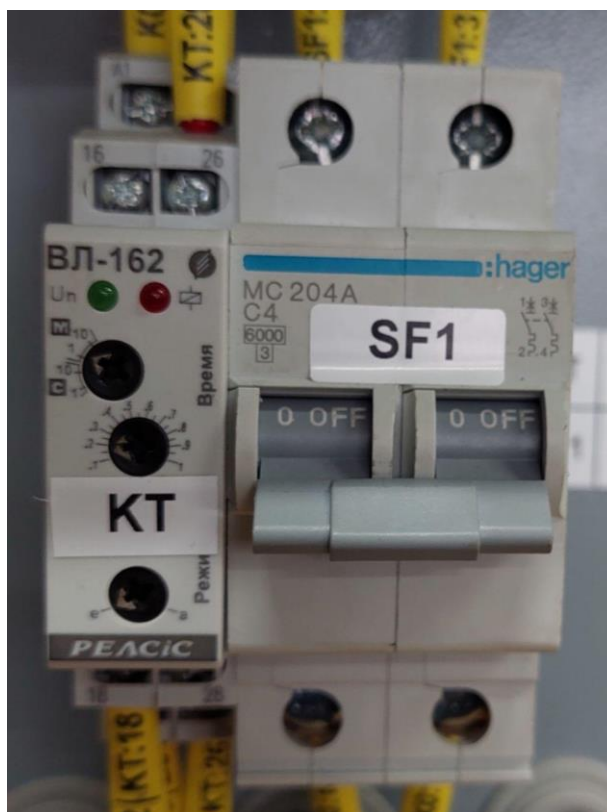


Рисунок 2.12 – Реле часу ВЛ-162 та автоматичний вимикач SF1

Для забезпечення подачі живлення та захисту електричних кіл на лабораторному стенді використовується автоматичний вимикач (SF1) Hager MCN204 2P з номінальним струмом 4 А (рис. 2.12).

Автоматичний вимикач MCN204 призначений для захисту електричних кіл від перевантажень та коротких замикань, що є важливою умовою безпечної експлуатації стенда. Основні характеристики вимикача: кількість полюсів - 2 (двополюсний, що дозволяє забезпечити захист фазного та нульового проводів).

Для виконання операцій увімкнення та вимкнення вимикача на лабораторному стенді використовується підпружинений ключ управління APATOR 4G10-52-U 63-840341-011, який завжди повертається у нульове положення після відпускання (рис. 2.13).

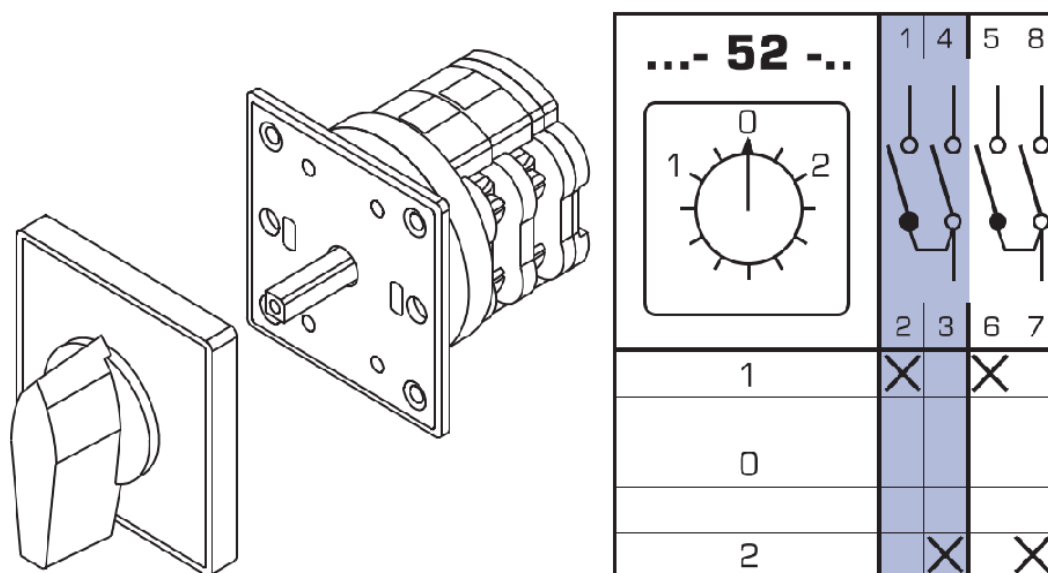


Рисунок 2.13 – Ключ управління

Основні характеристики ключа управління є наступними.

1. *Пружинний механізм повернення.* Завдяки підпружиненій конструкції, після виконання операції ключ автоматично повертається до початкового положення (0). Це мінімізує ризик залишення ключа в неналежному стані та забезпечує безпеку роботи.
2. *Положення ключа:*
 - 0 — Нейтральне положення: всі контакти роз'єднані;
 - 1 — Відключення вимикача: активується нормально відкритий контакт, що забезпечує подачу сигналу на вимкнення обладнання;
 - 2 — Ввімкнення вимикача: Інший нормально відкритий контакт замикається, забезпечуючи подачу сигналу на ввімкнення.

На лабораторному стенді для виведення кіл напруги та струму мікропроцесорного реле REF 615 використовуються сучасні клемники: Klemсан 304380 AVK 4A та Phoenix Contact UGSK 6 (рис. 2.14).

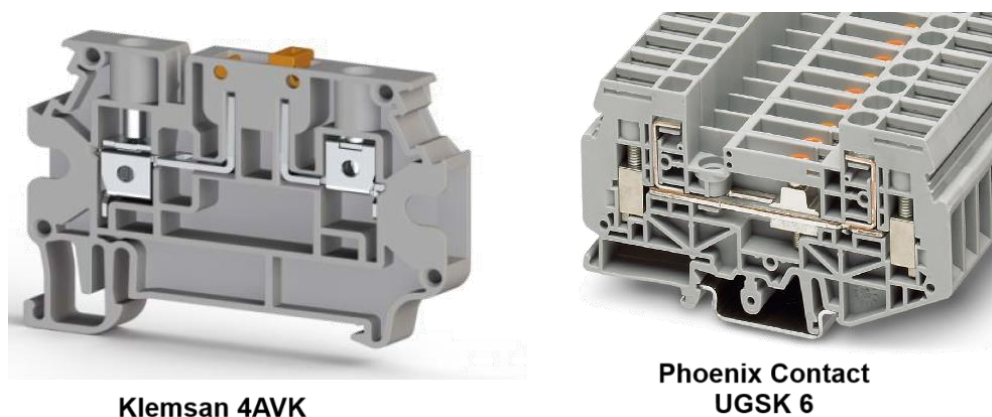


Рисунок 2.14 – Клемники Klemsan та Phoenix Contact

Характеристики клемника Klemsan 304380 AVK 4A:

- використовуються для підключення кіл напруги та частини живлення схеми;
- ці клемники мають зручний механізм підключення, що забезпечує швидке та надійне з'єднання.
- особливість — можливість розірвати контакт за допомогою вбудованого роз'єднувача без потреби від'єднання проводів.

Характеристики клемника Phoenix Contact UGSK 6:

- застосовуються для струмових кіл вимірювань та захисту;
- переваги:
 - висока електрична міцність: номінальна напруга до 400 В та переріз до 6 мм²;
 - надійність при короткочасних струмових перевантаженнях (до 0,72 кА для 6 мм²);
 - стійкість до екстремальних температур (- 60 °C до + 110 °C) та довговічність матеріалу.
 - відповідність стандартам безпеки (UL 94 V0, IEC 60947-7-1) та екологічним нормам (RoHS, REACH);
- відзначаються можливістю інтеграції аксесуарів, таких як перемички для з'єднання, що забезпечує більшу гнучкість у проектуванні схем.

Ці клемники дозволяють забезпечити організованість, безпеку і зручність у роботі з лабораторним обладнанням, що робить їх ідеальними для інтеграції в навчальні та технічні системи (рис. 2.14).

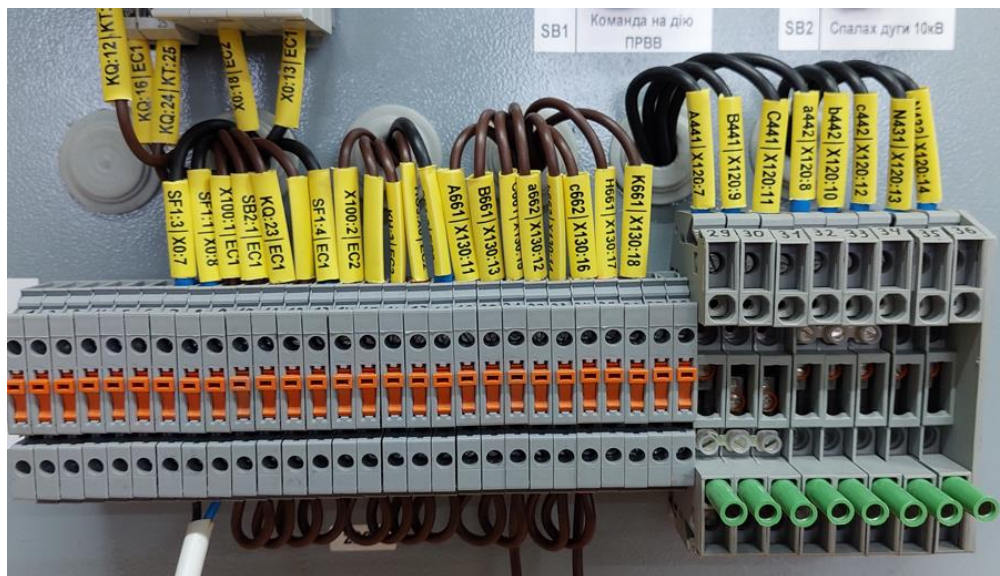


Рисунок 2.15 – Монтаж клемників на лабораторному стенді

3 РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Оперативна робота цифрових пристроїв релейного захисту

Ефективна робота систем електричного постачання промислових підприємств та електричних енергетичних систем зазвичай поєднана з правильною роботою обладнання релейного захисту та автоматики, які здійснюють швидке та селективне автоматичне усунення пошкоджень у цих системах [27].

Лінії електропередачі є найменш надійними елементами електроенергетичної системи і їх пошкодження завдає суттєвих збитків промисловості. Залежно від класу напруги цих ліній, конфігурації мережі, режиму заземлення нейтралі силових трансформаторів для їх захисту застосовуються різні пристрої, зокрема, пристроїв релейного захисту. Важливим фактором забезпечення ефективної роботи обладнання релейного захисту і автоматики є його оперативне обслуговування оперативним персоналом на енергетичних об'єктах, робота з пристроями релейного захисту і автоматики при їх спрацьовуванні, несправності, а також при перемиканнях в первинних або вторинних колах і при огляді [28].

Новітні мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики швидкими темпами встановлюються на енергетичних об'єктах і інтегрують в себе багато функцій, які раніше виконували окремі панелі та пристрої. Така методика дозволяє ефективніше функціонувати системам релейного захисту і автоматики та полегшити її обслуговування, зокрема, силових вимикачів. Основними функціями автоматики керування силовим вимикачем є формування команд на ввімкнення та вимкнення вимикача. Зазвичай електромеханічні вимикачі виконувались у вигляді окремих панелей зі схемами реалізації функцій контролю кіл котушок ввімкнення та вимкнення вимикача, контролю стану приводу, автоматичного повторного ввімкнення, захисту від неперемикання фаз ін. На даний час ці функції переймають на себе мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики з набагато ширшими можливостями та інтелектуальним програмним забезпеченням [29].

У цьому розділі кваліфікаційної роботи детально розглядаються функціональні можливості розробленого лабораторного стенду, його структура та робота основних компонентів. Особлива увага приділяється аналізу монтажно

схеми, де крок за кроком описуються принципи взаємодії елементів. Ключовим елементом стенду є мікропроцесорне реле **REF615**, яке запрограмоване для максимальної реалізації своїх функцій у рамках моделювання [30].

У ході дослідження буде розглянуто, як через різні кола комутації реалізуються функції такі реле: захист від дугових коротких замикань, сигналізація, індикація станів, а також інші режими, що забезпечують повну імітацію роботи реальних систем релейного захисту та автоматики на енергетичних об'єктах.

Цей розділ виконано наступні дослідження:

- логіка роботи всіх елементів, зокрема кнопок, перемикачів, реле, сигнальних ламп і вказівників;
- роботу функцій реле, які реалізовані через підключення та взаємодію з іншими компонентами стенда;
- особливості застосування інтелектуального електронного пристрою REF615 та його інтеграцію в лабораторний стенд.

Такий підхід дозволить повністю розкрити ідею стенда в якості навчально-експериментальної платформи для моделювання реальних процесів в енергетиці [31].

3.2 Живлення мікропроцесорного пристрою

Мікропроцесорне реле REF615 живиться через спеціальні входи **X100** на платі, зокрема, через **Вхід 1** і **Вхід 2**, що забезпечує його оперативну роботу. Оперативне живлення може подаватися від джерела постійного струму в діапазоні **110–250 В** або від джерела змінного струму з напругою **100–240 В**. Це робить пристрій універсальним для застосування на різних типах підстанцій.

Діапазон напруги для вимірювальних входів: напруга на входах реле може бути в межах **1–120 В** (залежно від конфігурації). Для фазних вимірювань зазвичай використовується напруга в межах **57–120 В**.

Діапазон струмів для вимірювальних входів: вхідні струмові кола підтримують номінальний струм **1 А** або **5 А**, а максимальний допустимий струм може досягати **100 А** протягом короткого часу (наприклад, при вимірюванні короткого замикання).

Таке гнучке налаштування параметрів живлення та вимірювальних входів дозволяє застосовувати REF615 у широкому спектрі задач із захисту та керування лініями розподілу електроенергії, трансформаторами, шинами тощо.

3.3 Блокування струмової відсічки

Дискретний вхід BI1, розташований на платі X120 мікропроцесорного реле REF615, відповідає за активацію функції блокування струмової відсічки. Це відбувається шляхом подачі оперативної змінної напруги 220 В через накладку SX1. При активації вхід сигналізує функціональному блоку **PHIPTOC1** про необхідність блокування струмової відсічки, що дозволяє тимчасово виключити її дію в певних умовах експлуатації (рис. 3.1).

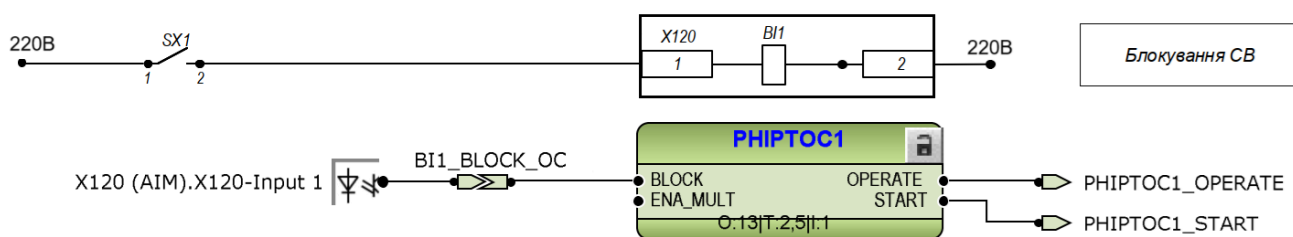


Рисунок 3.1 - Функціональний блок **PHIPTOC1**

Функціональний блок **PHIPTOC1** у мікропроцесорному реле **REF615** відповідає за реалізацію струмової відсічки (Phase Instantaneous Overcurrent Protection). Ця функція використовується для швидкого відключення обладнання у випадку перевищення порогового значення струму в фазних колах.

Основні особливості блоку **PHIPTOC1**:

- *швидкість реакції*: забезпечує миттєву реакцію на аварійні ситуації, що дозволяє зменшити пошкодження обладнання;
- *налаштування порогу спрацьовування*: дозволяє задати граничне значення струму, при перевищенні якого відбувається активація захисту;
- *блокування*: за допомогою дискретного входу (наприклад, BI1 на платі X120) можливо тимчасово заблокувати дію струмової відсічки. Це корисно під час проведення ремонтних робіт, пусконаладжувальних операцій або тестування обладнання.

Таким чином, функціональний блок **RHPTOC1** забезпечує ефективний і надійний захист обладнання від аварійних перевантажень, водночас залишаючи можливість для його гнучкого налаштування і адаптації до потреб експлуатації.

3.4 Контроль стану та керування вимикачем

На лабораторному стенді реалізовано імітацію контролю стану вимикача 10 кВ за допомогою дискретних входів **BI-2** і **BI-3**, що підключені до імітаційного реле **KQ** (рис. 3.2).

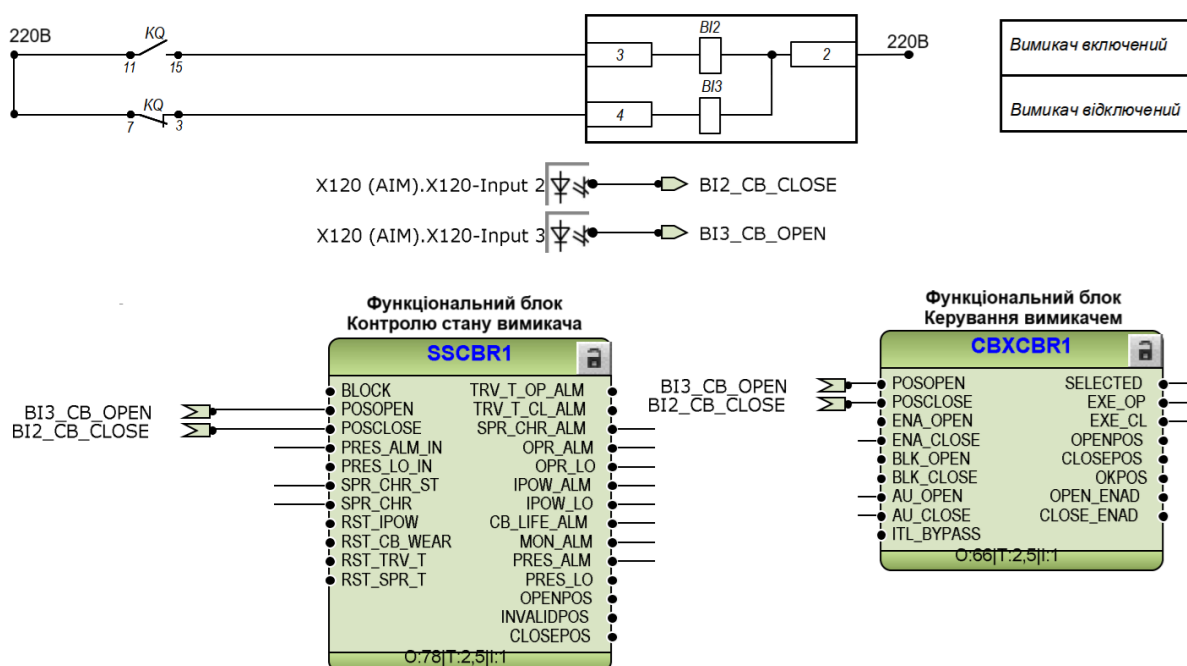


Рисунок 3.2 - Функціональні блоки контролю стану та керування вимикача

Принцип роботи дискретних входів **BI-2** і **BI-3** полягає в наступному:

- **BI-2**: реагує на зміну стану вимикача у положенні "увімкнено". Коли реле **KQ** імітує увімкнення вимикача, замикається контакт **KQ11.15**, подаючи оперативну змінну напругу 220 В на дискретний вхід **BI-2**. Це дозволяє пристрою ідентифікувати, що вимикач увімкнено;
- **BI-3**: визначає стан вимикача у положенні "вимкнено". У цьому випадку замикається контакт **KQ7.3**, подаючи змінну напругу 220 В на **BI-3**, що сигналізує пристрою про відключений стан вимикача.

Отримані сигнали з дискретних входів **BI-2** і **BI-3** використовуються для:

- відображення стану вимикача на дисплеї мікропроцесорного реле та на мнемосхемі.

- роботи функціональних блоків контролю стану вимикача (наприклад, перевірка, чи відповідає стан вимикача заданому положенню);
- керування функцією автоматичного повторного включення (АПВ):
 - перед початком АПВ мікропроцесорне реле перевіряє сигнал на **ВІ-3** (вимикач відключений) і погоджує його із роботою захистів які заведені під дію АПВ;
 - якщо після виконання АПВ активується **ВІ-2**, то пристрій визначає, що вимикач успішно ввімкнено;
 - у разі, якщо **ВІ-2** залишається неактивним, а **ВІ-3** активується, пристрій фіксує , що АПВ неуспішне .

Інформація з дискретних входів **ВІ-2** і **ВІ-3** дозволяє функціональному блоку керування вимикачем чітко розуміти поточний стан обладнання. Це необхідно для забезпечення коректної роботи інших функціональних блоків, таких як:

- логічна перевірка виконання операцій увімкнення або вимкнення;
- забезпечення безпечного виконання автоматизованих операцій.

Це дуже важливо, оскільки, якщо пристрій некоректно визначає стан вимикача, то це може призвести до серйозних наслідків, таких як:

- аварійна робота захисту, що може спричинити відключення електропостачання без необхідності.
- невиконання захисту, коли він критично потрібен, наприклад, при короткому замиканні.
- збої у роботі схем автоматизації, що можуть вплинути на стабільність всієї системи.

На лабораторному стенді для контролю стану вимикача також було реалізовано фізичну мнемосхему, що використовує сигнальні лампи різних кольорів для візуального відображення стану вимикача. Ця система дає змогу черговому персоналу швидко оцінити стан обладнання без необхідності звертатися до мікропроцесорного реле **REF615**, що значно пришвидшує роботу в умовах обмеженого часу, особливо в аварійних ситуаціях (рис. 3.3).

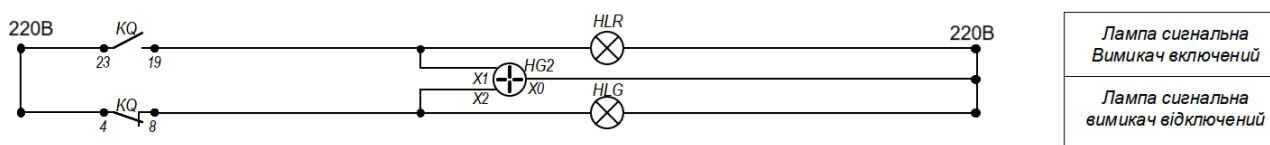


Рисунок 3.3 - Фізична мнемосхема візуального відображення стану вимикача

Сигнальні лампи мають наступне призначення:

- червона лампа **HLR**: вмикається через контакти імітаційного реле **KQ 23-19**, сигналізуючи, що вимикач увімкнений. Це індикація того, що обладнання знаходиться в робочому стані.

- зелена лампа **HLG**: Вмикається через контакти імітаційного реле **KQ 4-8**, сигналізуючи, що вимикач вимкнений і система знаходиться в стані безпеки.

Лампа ідентифікатора **HG2** на мнемосхемі візуально показує стан вимикача за допомогою вертикальної червоної лінії для увімкненого стану та горизонтальної зеленої лінії для вимкненого. Така візуалізація дає змогу оперативно оцінити стан вимикача.

Переваги фізичної мнемосхеми полягають у наступному:

- *швидкість реагування* - черговий персонал може миттєво з'ясувати стан вимикача, не вмикаючи дисплей на пристрої **REF615**. Це суттєво зменшує час на прийняття рішень, особливо у випадках, коли час на виконання операцій критично обмежений;

- *безпека* - візуальні сигнали дозволяють персоналу швидко зреагувати на зміну стану вимикача та вжити необхідних заходів у випадку аварійної ситуації, не відволікаючись на додаткові перевірки.

Ця система наочно демонструє важливість правильного та швидкого визначення стану ключових елементів у комплексних електричних системах, де кожна затримка може вплинути на загальну безпеку та ефективність роботи.

3.5 Пристрій резервування відмови вимикача

Функція резервування відмови вимикача (**ПРВВ**) на лабораторному стенді реалізована таким чином, щоб симулювати ситуацію, коли виникає відмова вимикача. Для цього використовується кнопка **SB1**, яка імітує сигнал від відхідної

комірки 10 кВ про відмову вимикача. Цей сигнал передається на дискретний вхід комірки, в даному випадку, вхід **ВІ4** плати **X120** мікропроцесорного реле **REF615**. Коли на дискретний вхід **ВІ4** надходить команда, пристрій активує світлодіод номер 6 із списку запрограмованих світлодіодів, що індикує дію **ПРВВ**. Оскільки стенд є лабораторним, і в ньому відсутній другий вимикач для повної імітації, додатково сигнал з **ВІ4** подається на логічний блок **OR**. З цього блоку виходить команда, яка ініціює спрацювання функціонального блоку логіки відключення.

Цей процес демонструє, як у реальному обладнанні працюють функції резервування і відмови вимикача. При відмові одного елементу системи, пристрій автоматично переходить до резервного сценарію, що забезпечує безперервність роботи та підвищує надійність системи.

3.6 Опис функціонального блоку логіки відключення

Функція **TRPPTRC** використовується для передавання сигналу від функцій захисту через логіку відключення. Вона забезпечує достатню тривалість сигналу для виконання необхідних дій. Логіка відключення є важливою для забезпечення трифазного відключення при будь-яких типах пошкоджень. Для запобігання автоматичному ввімкненню автоматичного вимикача після відключення, функція **TRPPTRC** може заблокувати включення **СВХСВР**.

Функція **TRPPTRC** підключається до котушки вимикача для відключення. Якщо потрібно здійснити відключення іншої котушки або вимикача з іншим часом імпульсу відключення, застосовується інша логіка відключення. Два екземпляри функції ідентичні, але їх функції мають різні імена: **TRPPTRC1** і **TRPPTRC2**, що дозволяє гнучко налаштовувати систему (рис. 3.4).

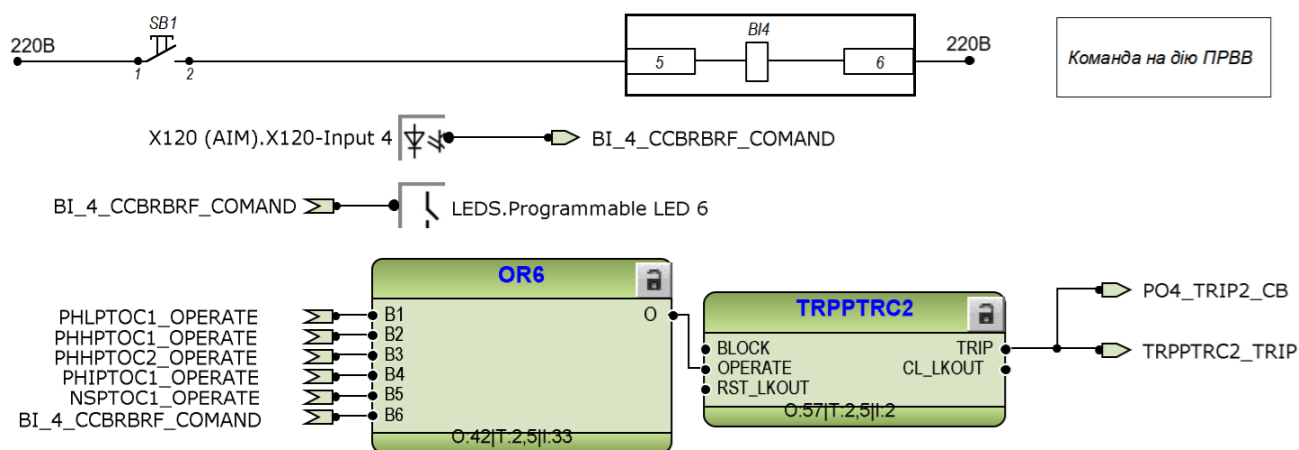


Рисунок 3.4 – Схема роботи логічних блоків **TRPPTRC** і **OR**

Вхід **OPERATE** приймає сигнали від функцій захисту, а для заведення виходів функцій через цей вхід часто використовується логічний блок **OR** (АБО). Вихід **TRIP** підключається до дискретних виходів плати входів/виходів **ІО**. Цей сигнал також може бути використаний в інших цілях, наприклад, для запуску **ПРБВ**.

Таким чином, система резервування відмови вимикача на лабораторному стенді побудована з урахуванням принципів реальних релейних захистів і дозволяє повністю симулювати роботу схеми у разі відмови вимикача.

3.7 Імітація відключення на шинах автомата кіл ТН

Накладка **SX2** на лабораторному стенді виконує важливу функцію, яка забезпечує коректну роботу системи під час операцій у вторинних колах напруги. Коли накладка **SX2** введена в дію, вона подає змінну напругу 220 В через свій контакт на дискретний вхід **ВІ1** плати **X110** (рис. 3.5).

При появі напруги на цьому дискретному вході пристрій **REF615** автоматично блокує функцію захисту по зниженню напруги. Це дозволяє виконувати роботи у вторинних колах напруги без ризику помилкового відключення основного обладнання через хибне спрацювання захисту.

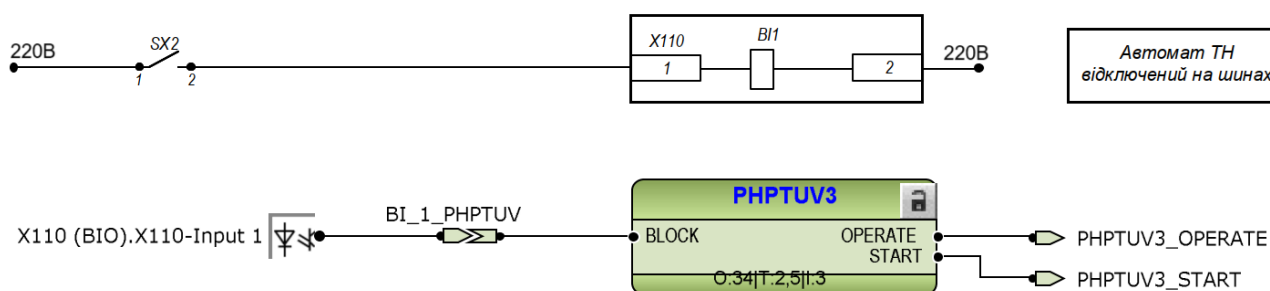


Рисунок 3.5 – Схема роботи автомата ТН, відключеного на шинах

Необхідність накладки SX2 виникає у випадку, коли потрібно вимкнути автомат вторинних кіл напруги для проведення технічного обслуговування або діагностики. У цей момент пристрій релейного захисту може "побачити" зникнення напруги і помилково розцінити це як аварійне зниження напруги в мережі. Як наслідок, захист по зниженню напруги спрацює, що призведе до відключення обладнання. Введення накладки SX2 вирішує цю проблему. Активуючи її, оператор забезпечує блокування функції захисту на період робіт із вторинними колами, виключаючи можливість хибного спрацьовування захисту.

Додаткові переваги полягають у тому, що Цей механізм є особливо важливим для підвищення безпеки робіт в умовах, коли час на виконання операцій обмежений, а ризик помилкових відключень може спричинити значні економічні або технічні втрати. Використання накладки SX2 дозволяє проводити технічне обслуговування з мінімальними втратами для основного обладнання. Накладка SX2 виконує роль засобу підвищення гнучкості та надійності системи, забезпечуючи безпомилкову роботу захисту навіть за умов тимчасової відсутності напруги в вторинних колах. Це рішення є типовим для реальних енергетичних об'єктів і дозволяє адаптувати роботу обладнання під конкретні потреби експлуатації.

3.8 Функція автоматичного повторного включення

Функція АПВ у пристрої REF615 дозволяє автоматично відновлювати живлення після аварійного відключення. У лабораторному стенді її активація контролюється за допомогою накладки SX3. Напруга 220 В змінного струму подається на дискретний вхід BI2 плати X110, після чого функція АПВ вводиться

в роботу, але не спрацьовує негайно. Вона переходить у режим очікування, готова реагувати на команди або сигнали, що ініціюють повторне включення (рис. 3.6).

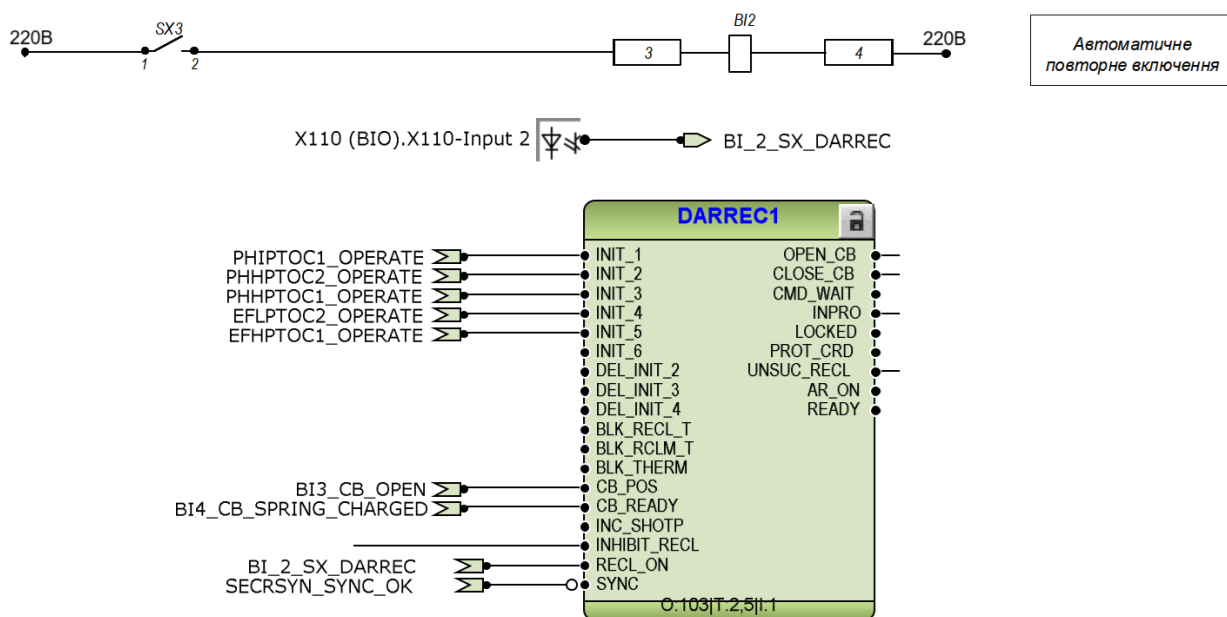


Рисунок 3.6 – Схема роботи автоматичного повторного включення

Принцип роботи АПВ полягає у наступному:

- *введення функції АПВ у роботу* - активування накладки **SX3** забезпечує появу напруги на дискретному вході **BI2**, що дозволяє функції **АПВ** працювати. У цьому стані пристрій готовий до виконання автоматичного повторного включення у разі аварійного відключення;

- *очікування команди* - функція **АПВ** не виконує повторне включення одразу після подачі напруги на дискретний вхід. Вона чекає на сигнал від захисту або іншого функціонального блоку, що ініціює її роботу;

- *виведення функції АПВ* - при відключенні накладки **SX3** напруга з дискретного входу зникає, і функція **АПВ** блокується. Це забезпечує захист від небажаного автоматичного відновлення живлення.

Функцію АПВ виводять у наступних випадках:

- *при плановому технічному обслуговуванні* – щоб запобігти випадковому відновленню живлення під час роботи персоналу у вторинних колах або на об'єктах, функцію АПВ потрібно вимкнути;

- *при тривалих або серйозних пошкодженнях* - у разі стійкого пошкодження, яке не може бути усунене автоматично, виведення АПВ запобігає циклічному включенню та відключенню, що може спричинити додаткові проблеми в мережі;

- *при невизначеності причин аварійного відключення* - якщо причина аварійного відключення невідома, автоматичне включення може погіршити ситуацію або спричинити додаткове пошкодження обладнання;

- *при ремонтні роботи в мережі* - під час обслуговування обладнання чи мережі виведення функції АПВ забезпечує безпеку персоналу та запобігає небажаним реакціям системи;

- *при використанні застарілого або обмеженого обладнання* - якщо вимикачі або інше обладнання мають обмежений ресурс механічних включень/відключень, відключення АПВ запобігає передчасному зносу.

Функціональні можливості АПВ полягають у наступному:

✓ *множинні спроби* - функція підтримує до п'яти програмованих циклів АПВ з різними типами спрацьовувань (швидко або з витримкою часу);

✓ *інтеграція із захистами* - АПВ працює у взаємодії з іншими функціональними блоками, такими як логіка відключення, блок контролю напруги тощо;

✓ *запобігання повторному включенню* - при стійкому пошкодженні функція виконує остаточне відключення, блокуючи повторну подачу напруги до усунення проблеми.

Функція **АПВ** забезпечує ефективну роботу енергосистеми, мінімізуючи вплив короткочасних замикань. Однак її правильне введення та виведення в роботу є критично важливим для забезпечення безпеки та надійності мережі.

Функція автоматичного повторного включення (**АПВ**) у пристрої **REF615** не активується за всіма видами захистів, а лише за тими, які спеціально призначені для її роботи. До таких захистів належать:

- максимальний струмовий захист (МСЗ);
- ненаправлений захист від замикань на землю.

При спрацьовуванні інших видів захистів, таких як:

- дуговий захист;

- захист від несправностей вимикача (несправний тиск газу, несправна пружина);
- блокування через різні причини несправності вимикача.

Функція АПВ блокується, і повторне включення вимикача не виконується. У цих випадках вимикач залишається у вимкненому стані, а спроба включення блокується остаточно, щоб уникнути пошкоджень обладнання чи загрози безпеці. Таке обмеження необхідне для забезпечення надійності системи, адже повторне включення після серйозних або стійких несправностей може призвести до додаткових пошкоджень. АПВ працює лише в умовах, коли ймовірність короточасних або самовідновлюваних несправностей є високою, і автоматичне включення не створює додаткових ризиків.

3.9 Імітація несправності вимикача

Накладка **SX4** створює імітацію різних несправностей вимикача **10 кВ**, що необхідно для тестування роботи захистів та блокувань. Її функціонування розглянемо у двох станах накладки **1 і 2**:

Імітація зниження тиску газу у вимикачі (стан накладки 1):

- при перемиканні накладки **SX4** у положення 1, розмикається контакт **1-2**, і оперативна напруга зникає на дискретному вході **ВІЗ** плати **X110**;

- пристрій **REF615** сприймає це як зниження тиску газу у вимикачі. У результаті:

- блокується можливість включення вимикача незалежно від інших умов,
- включення залишається заблокованим до усунення несправності або вимкнення накладки,
- таке блокування є важливим, оскільки низький тиск газу може свідчити про серйозні несправності вимикача, які загрожують надійності та безпеці системи.

Імітація несправності пружинного привода (стан накладки 2):

- у стані 2 накладки **SX4** розмикається інший контакт, що створює сигнал про те, що пружина привода вимикача не заведена;

- пристрій отримує сигнал про те, що вимикач знаходиться в розрядженому стані. У цьому випадку:

- імітується стан, коли механізм приводу не готовий до роботи;
- для вирішення проблеми потрібно виконати підзаведення пружини вручну або усунути несправності, такі як:
 - поломка редуктора,
 - вихід із ладу мотора підзаведення,
 - несправність кінцевих вимикачів, які сигналізують про готовність приводу;

- як і у випадку з імітацією зниження тиску газу, включення вимикача в цьому стані блокується.

Такі функції накладок **SX4** дозволяють моделювати реальні несправності обладнання для перевірки коректності роботи захистів, блокувань та інших функцій пристрою **REF615**, що значно підвищує надійність системи в реальних умовах.

Організація імітації підзаведення пружинного приводу. Для моделювання процесу підзаведення пружинного приводу на лабораторному стенді реалізована схема, яка враховує стан вимикача та роботу накладки **SX4**. Розглянемо її крок за кроком. На рис. 3.7 представлена схема імітації заведення приводу із можливістю створення штучної несправності, а також взаємодія несправностей вимикача, таких як низький тиск газу та незаведена пружина, із функцією автоматичного повторного включення. Розглянемо ці стани.

1. *Нормальний стан* (вимикач вимкнений, пружина заведена):

- у вимкненому стані вимикача оперативна напруга 220 В змінного струму проходить через:
 - нормально закритий контакт **3-4** накладки **SX4**,
 - нормально закритий контакт вимикача;
- напруга подається на дискретний вхід **VI-4**.

Пристрій **REF615** розпізнає це як сигнал про заведений стан пружини і дозволяє виконати включення вимикача.

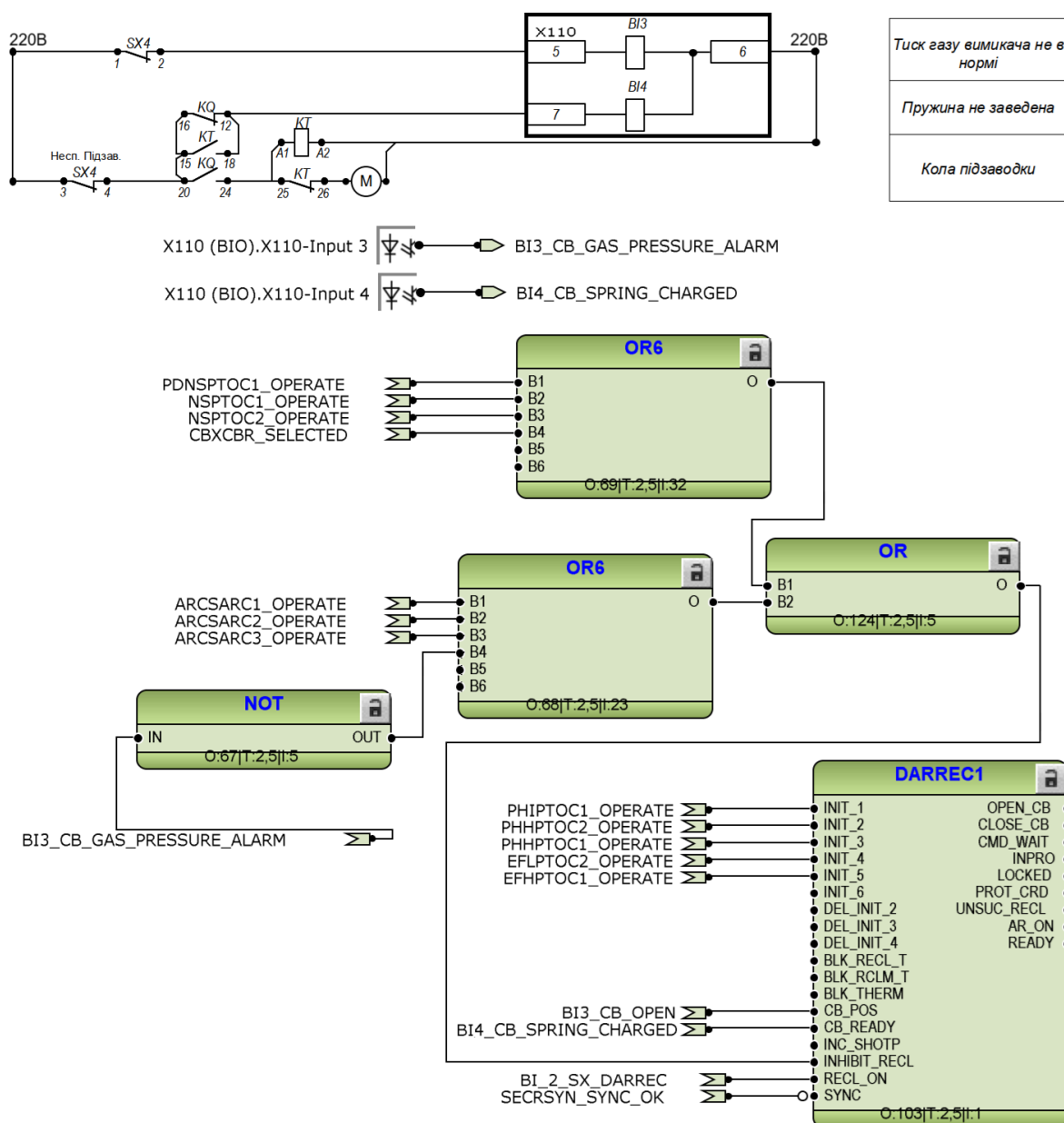


Рисунок 3.7 – Схема стану вимикача та роботи накладки SX4

2. Стан під час увімкнення вимикача:

- коли вимикач включається:
 - нормально закритий контакт **KQ 16-12** розривається,
 - нормально відкритий контакт **KQ 20-24** замикається;
- через контакт **KQ 20-24** напруга починає подаватися на:
 - обмотку реле часу (**KT**),
 - паралельно через нормально закритий контакт реле часу **KT 25-26** на привід двигуна підзаведення пружини.

3. Підзаведення пружини (робота реле часу):

- двигун підзаведення працює до досягнення часу уставки на реле часу **КТ** (у даній схемі це 8 секунд);
- по завершенні уставки:
 - контакт реле часу **КТ 25-26** розмикається, припиняючи живлення двигуна підзаведення,
 - контакт реле часу **КТ 15-18** замикається, і через нього оперативна напру-га подається на дискретний вхід **ВІ-4**.

4. Сигнал про готовність (заведена пружина):

- при подачі напруги на вхід **ВІ-4** пристрій **REF615** отримує інформацію про те, що пружина заведена;
- вимикач готовий до наступного включення.

Особливості реалізації полягають у наступному:

- ✓ використання накладки **SX4** дозволяє імітувати збої в підзаведенні пружини, що є важливим для тестування захистів;
- ✓ схема забезпечує чіткий контроль за станом привода, запобігаючи включенню вимикача в разі несправності або незаведеного стану пружини;
- ✓ така організація схеми дає можливість забезпечити повну імітацію реальних умов експлуатації вимикача.

Якщо час підзаведення приводу збільшено, пристрій може зафіксувати триваліший період заводу приводу. Це може бути спричинено несправністю редуктора, відсутністю належного змащення або механічні пошкодження редуктора можуть уповільнити процес підзаведення.

3.10 Імітація роботи вимикача 10 кВ та заземлюючих ножів

На лабораторному стенді реалізовано функцію імітації процесів вкочення та викочення вимикача 10 кВ у комірку за допомогою перемикача **SX5**. Ця функція виконується наступним чином:

Вкочення вимикача (позиція 1). При встановленні перемикача **SX5** у позицію 1:

- на мнемосхемі пристрою засвічується лампа **HG1** червоним кольором, що означає, що вимикач вкочено в комірку 10 кВ у робоче положення;

- напруга 220 В змінного струму подається на дискретний вхід **BI-5** плати **X110**;

- пристрій отримує сигнал про те, що вимикач знаходиться у робочому положенні. На мнемосхемі пристрою відображається індикація цього стану.

Викочення вимикача (позиція 2): При встановленні перемикача **SX5** у позицію 2:

- на мнемосхемі пристрою засвічується лампа **HG1** зеленим кольором, що означає, що вимикач викочено з комірки 10 кВ у контрольний стан;

- напруга 220 В подається на дискретний вхід **BI-6** плати **X110**;

- на мнемосхемі пристрою також відображається стан викочення вимикача.

Використання сигналів у функціональних блоках:

- сигнали, що надходять на дискретні входи **BI-5** та **BI-6**, передаються на різні функціональні блоки пристрою.

- найважливішим є блок керування вимикачем **CBXCBR1**:

- цей блок дає дозвіл на увімкнення вимикача лише за наявності сигналу **OKPOS** від функціонального блоку індикації стану вкочення вимикача **DCSXSWI1**,

- сигнал **OKPOS** генерується тільки тоді, коли на дискретний вхід **BI-5** або **BI-6** надходить напруга. Це підтверджує, що вимикач або вкочений, або викочений,

- у разі відсутності сигналу на обох входах **BI-5** і **BI-6** (тобто стан вимикача невідомий), увімкнення вимикача блокується, оскільки пристрій не може визначити положення вимикача.

Особливості реалізації полягають у наступному:

- така схема імітації дозволяє наочно відстежувати стан вимикача на мнемосхемі як в пристрої REF615, так і на фізичній мнемосхемі лабораторного стенда;

- сигнали стану є ключовими для безпечної роботи функцій керування та захисту, включаючи функцію АПВ.

Імітація вкочення та викочення вимикача забезпечує не лише зручність тестування, але й необхідну точність у роботі логічних функцій управління, що критично важливо для відтворення реальних умов експлуатації вимикачів на

лабораторному стенді. На рис. 3.8 представлено схему імітації вкочення та викочення вими-кача 10 кВ, а також програмну логіку управління пристроєм **REF615** і його взає-модія з іншими функціональними блоками.

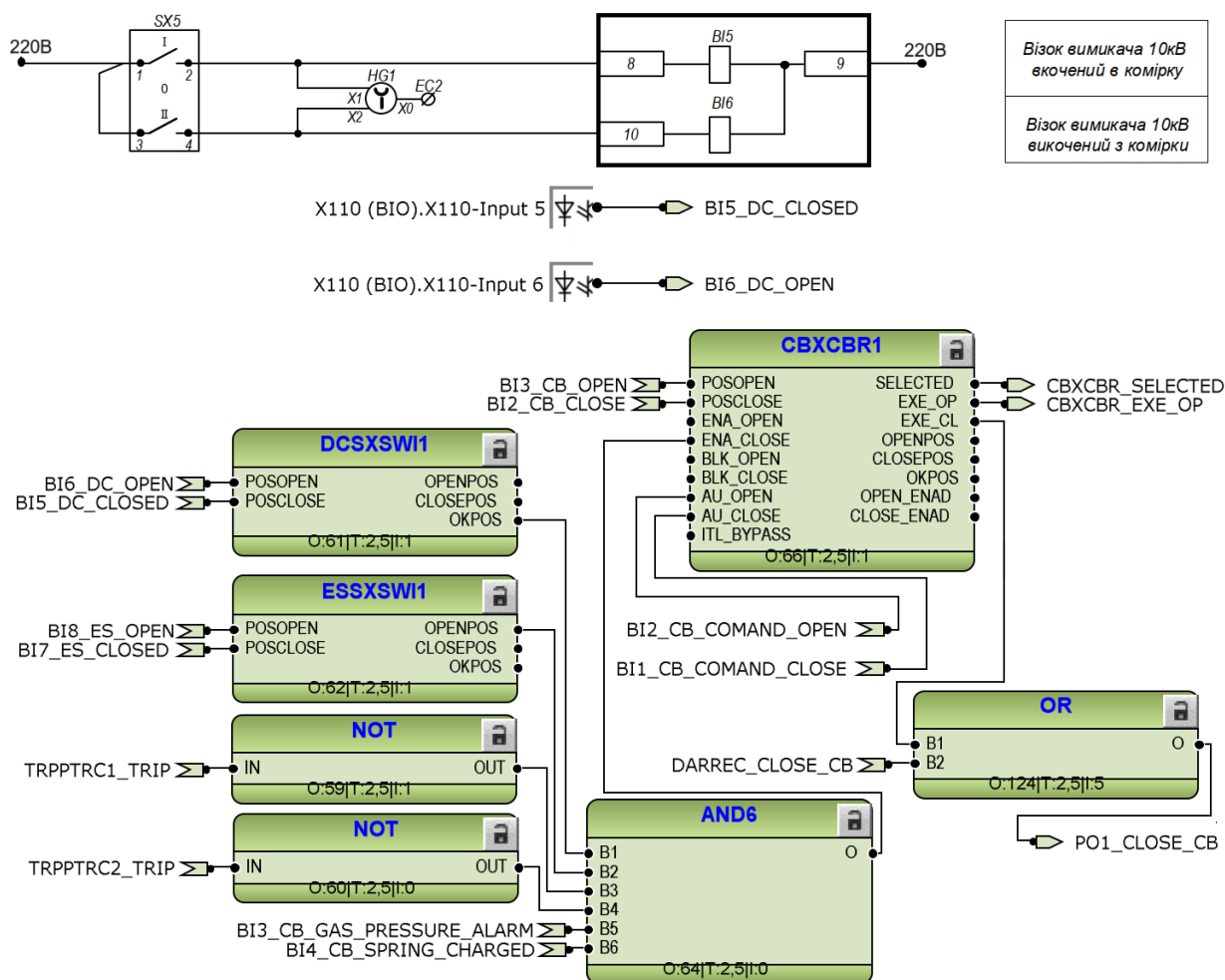


Рисунок 3.8 – Робота функціонального блоку керування вимикачем **CBXCBR**

На лабораторному стенді також реалізовано імітацію роботи заземлюючих ножів за допомогою перемикача **SX6**, який змінює свою позицію для відтворення різних станів заземлюючого обладнання (рис. 3.9). Принцип роботи приведено нижче.

Увімкнення заземлюючих ножів (позиція 1):

- перемикач **SX6** подає напругу 220 В на дискретний вхід **BI7** плати **X110**;
- пристрій **REF615** отримує сигнал і фіксує, що заземлюючі ножі увімкнені.

Одночасно цей сигнал подається на лампу-індикатор **HG3**, яка засвічується червоною вертикальною лінією, що означає стан увімкнення ножів.

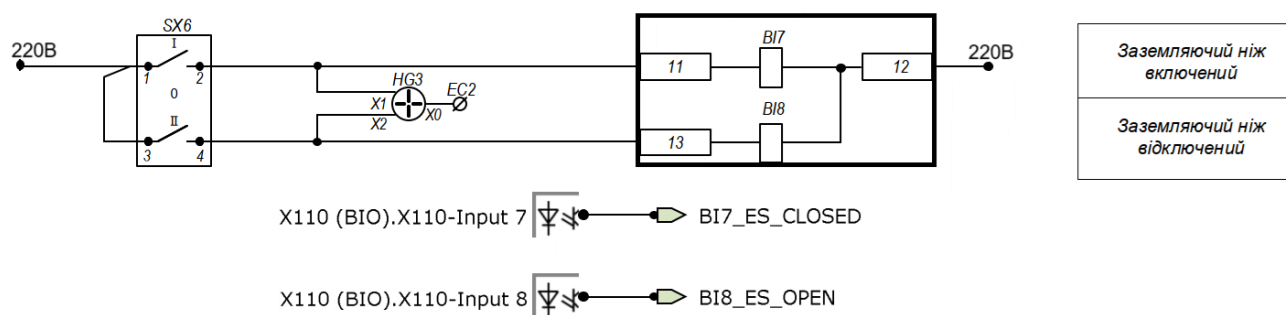


Рисунок 3.9 – Робота функціонального блоку керування заземлюючими ножами

Вимкнення заземлюючих ножів (позиція 2):

- перемикач **SX6** подає напругу 220 В на дискретний вхід **BI8**;
- пристрій фіксує сигнал і визначає, що заземлюючі ножі вимкнені;
- лампа-індикатор **HG3** змінює індикацію на зелену горизонтальну лінію, яка сигналізує про вимкнення ножів.

Взаємодія функціональних блоків є наступною:

- сигнали з дискретних входів **BI7** та **BI8** надходять на функціональний блок управління заземлюючими ножами **ESXSWI1**;
- блок **ESXSWI1** генерує вихідний сигнал **OPENPOS**, який свідчить про відключення ножів. Цей сигнал формується лише за наявності сигналу на дискретному вході **BI8** (стан вимкнення ножів);
- вихідний сигнал **OPENPOS** передається до блоку управління вимикачем **CBXCBR1**, зокрема на вхід **ENACLOSE**, що відповідає за дозвіл на увімкнення вимикача;
- увімкнення вимикача можливе лише за умови виконання всіх умов, заведених на вхід **ENACLOSE**, що реалізується через логічний блок **AND**. Якщо хоча б один із сигналів відсутній або має значення 0, дозвіл на увімкнення вимикача блокується.

Дана система забезпечує додаткову безпеку, унеможливаючи помилкове увімкнення вимикача, якщо заземлюючі ножі знаходяться у стані увімкнення. Це особливо важливо для запобігання аварійним ситуаціям під час технічного обслуговування або ремонту. Взаємодія функціонального блоку управління заземлюючими ножами **ESXSWI1** з блоком керування вимикачем показана на рисунку. “Робота функціонального блоку керування вимикачем **CBXCBR**”.

3.11 Фізичний ключ керування вимикачем SA

Цей ключ забезпечує ручне управління вимикачем 10 кВ і виконує команди його увімкнення або відключення.

Принцип роботи ключа полягає у наступному.

Команда на відключення вимикача (позиція 1):

- При обертанні ключа **SA** у позицію 1 напруга проходить через контакти **1-2** на дискретний вхід **BI2** плати **X130**.

- Це сприймається пристроєм як команда на відключення вимикача 10 кВ.

Команда на увімкнення вимикача (позиція 2):

- При обертанні ключа **SA** у позицію 2 напруга надходить через контакти **3-4** на дискретний вхід **BI1** плати **X130**.

- Пристрій інтерпретує цей сигнал як команду на увімкнення вимикача 10 кВ.

Взаємодія з функціональними блоками є наступною:

- сигнали з дискретних входів **BI1** (увімкнення) та **BI2** (відключення) надходять до функціонального блоку керування вимикачем **CBXCVR**;

- **CBXCVR** перевіряє всі необхідні умови перед передачею команди на виконання:

- ✓ сигнали від функціонального блоку управління позицією вимикача у комірці 10 кВ (**DCSXSWI1**),
- ✓ стан тиску газу у вимикачі,
- ✓ стан пружини приводу,
- ✓ додаткові сигнали від блоків **TRPPTRC1** і **TRPPTRC2**, що проходять через логічні блоки **NOT** (інверсії), щоб перевірити відсутність сигналу аварій-ного відключення.

Умови для виконання команд є такими:

- для дозволу увімкнення вимикача, всі вхідні сигнали на вхід **ENACLOSE** блоку **CBXCVR** повинні мати значення **1**;

- в іншому випадку увімкнення буде заблоковано до усунення причин, які перешкоджають виконанню команди.

Взаємодія ключа керування з функціональними блоками приведена на рисунку 3.10.

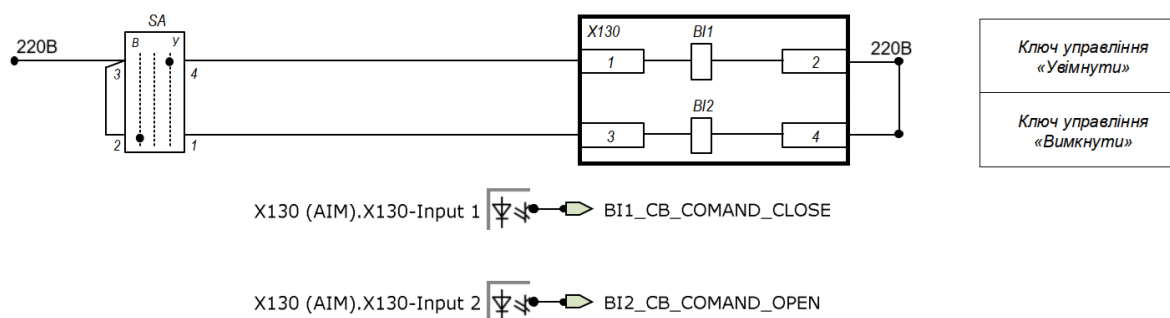


Рисунок 3.10 – Робота функціонального блоку керування вимикачем **CBXCVR**

Фізичний ключ **SA** дублює функції локального інтерфейсу **REF615** і є важливим апаратним елементом для ручного управління вимикачем. Це підвищує зручність та гнучкість експлуатації обладнання, дозволяючи оператору швидко виконувати дії у разі потреби.

3.12 Імітація роботи дугового захисту

Для перевірки роботи функції дугового захисту в мікропроцесорному пристрої було реалізовано спеціальний механізм імітації. Основою імітації є лампа, яка вмикається під час натискання кнопки **SB2** (рис. 3.11).

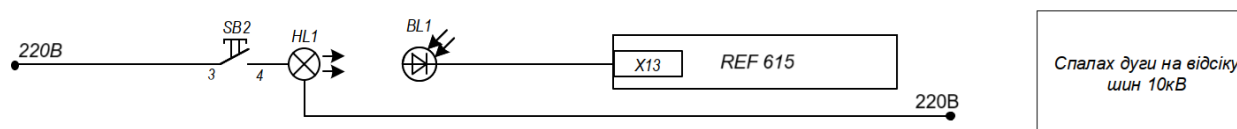


Рисунок 3.11 – Робота функціонального блоку дугового захисту

Принцип роботи імітації описано нижче.

Ініціація спалаху дуги:

- при натисканні кнопки **SB2** лампа загоряється, імітуючи спалах дуги в відсіку шин;
- світло від лампи через оптоволокну передається до оптичного входу мікропроцесорного реле, яке розташоване на платі **X-130** (з'єднання через **X13**).

Реакція пристрою:

- пристрій сприймає світловий сигнал через оптоволокно як індикацію дугового пробою;
- залежно від налаштувань функціонального блоку **ARCSARC** (дугового захисту), реле формує команду на негайне відключення вимикача;
- також блокується функція АПВ, оскільки дугові пробої вважаються критичними, і їх автоматичне усунення є майже неможливим.

Функція дугового захисту відповідає за виявлення дугових пробоїв у комірках і розподільних пристроях із повітряною ізоляцією. Основні аспекти роботи полягають у наступному:

- *детекція дуги* - виявляє світловий сигнал за допомогою світлового датчика. Може працювати локально або дистанційно;
- *аналіз струмів* - для точнішої діагностики контролює фазні струми та струм нульової послідовності;
- *режими роботи*:
 - ✓ *дуга+струм* - активується на основі комбінації сигналу світла і перевищення струму,
 - ✓ *тільки дуга* - робота базується виключно на світловому сигналі,
 - ✓ *пуск від дискретного входу* - віддалено керується сигналами з дискретних входів.

Функція має механізм блокування, який:

- відключає всі виходи;
- скидає таймери до початкового стану.

Дуговий захист забезпечує швидке виявлення і усунення аварій, які можуть призвести до серйозних пошкоджень обладнання або створити небезпеку для персоналу. Різні режими роботи дозволяють адаптувати захист до умов експлуатації. Система імітації дугового захисту дає можливість перевіряти та налаштовувати обладнання без реального виникнення аварійних ситуацій.

3.13 Команди на увімкнення та вимкнення вимикача від REF 615

Команда на увімкнення:

- команда на увімкнення вимикача реалізується через вихідний контакт **PO1** пристрою **REF 615**;
- формування команди:
 - ✓ блок керування вимикачем формує команду на увімкнення,
 - ✓ функція АПВ також може ініціювати увімкнення, якщо всі умови для роботи виконано;
- при формуванні команди контакт **PO1** замикається, що забезпечує подачу напруги **220 В** на котушку увімкнення імітаційного реле вимикача 10 кВ (**KQ**). У результаті реле спрацьовує і вимикач переходить у стан "увімкнено" (рис. 3.12).

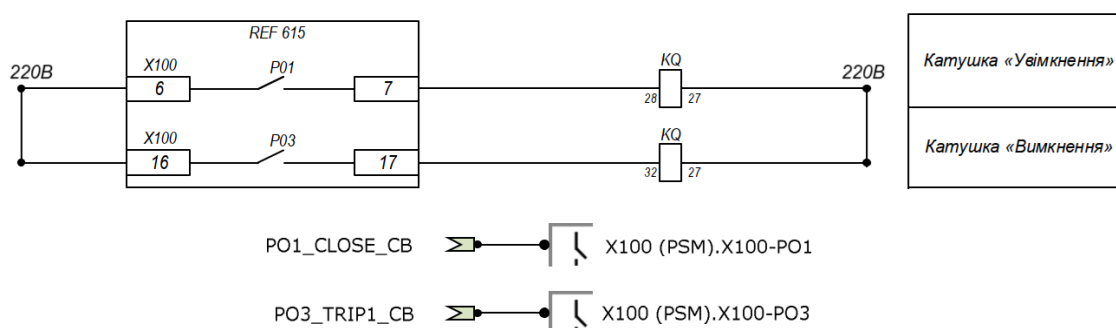


Рисунок 3.12 – Функціональний блок команд на увімкнення та вимкнення

Команда на вимкнення:

- команда на вимкнення вимикача реалізується через вихідний контакт **PO3** пристрою **REF 615**;
- формування команди - аналогічно команді на увімкнення, вона формується блоком керування вимикачем та блоком АПВ
- при формуванні команди контакт **PO3** замикається, забезпечуючи подачу напруги 220 В на котушку вимкнення імітаційного реле вимикача 10 кВ. Це приводить до того, що реле спрацьовує, і вимикач переходить у стан "вимкнено".

Особливості реалізації цього блоку описані нижче.

Логіка керування:

- блок керування вимикачем у **REF 615** перевіряє виконання всіх умов для увімкнення або вимкнення вимикача (наприклад, сигнали стану заземлюючих ножів, стан пружини привода, тиск у вимикачі тощо),

○ якщо хоча б одна з умов не виконана, команда не буде реалізована (команда на увімкнення);

інтеграція АПВ - блок АПВ забезпечує автоматичне відновлення роботи після аварійного відключення, якщо умови в мережі дозволяють це.

3.14 Сигналізація на лабораторному стенді за допомогою вказівних реле

Для сповіщення про аварійне відключення вимикача на лабораторному стенді використовуються вказівні реле КН1, КН2 та КН3, а також світлодіоди на локальному інтерфейсі людина-машина мікропроцесорного реле REF615 (рис. 3.13).

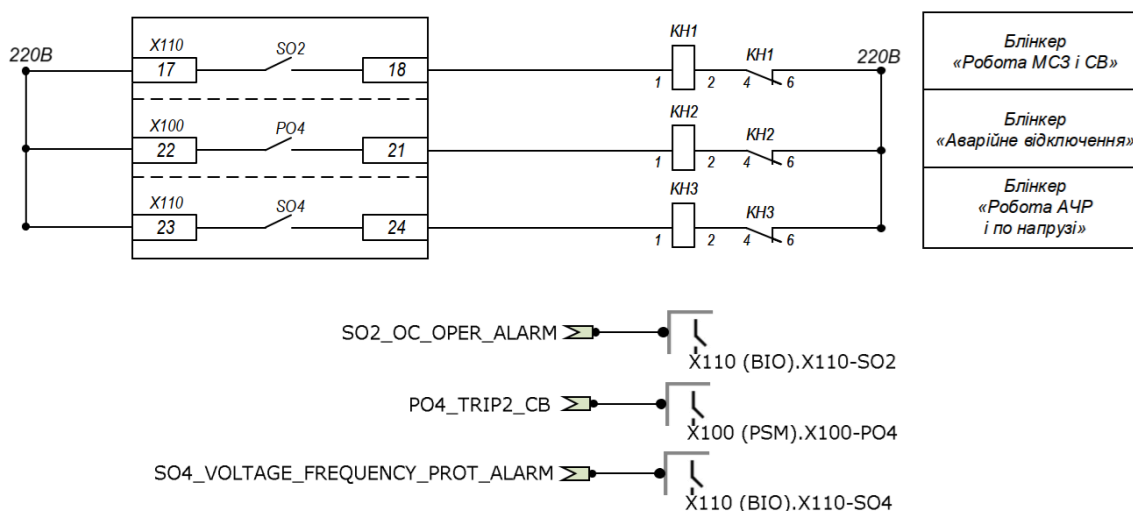


Рисунок 3.13 – Функціональний блок сигналізації за допомогою вказівних реле

Реле КН1:

○ коли вимикач відключається аварійно через струмові захисти, такі як МСЗ або струм відсічення, паралельно з відключенням вимикача замикається контакт сигналізації SO2 на платі X110;

- напруга 220 В подається на котушку вказівного реле КН1, яке спрацьовує;
- після спрацьовування реле розриває своє живлення, щоб запобігти перегріву катушки за умови тривалого присутності аварійного сигналу;
- важливо зазначити, що ці сигнали подаються імпульсно, без фіксації.

Реле КН2:

○ вказівне реле КН2 спрацьовує, коли вимикач аварійно відключається через будь-який із захистів;

○ у цьому випадку команда на спрацювання подається від вихідного реле пристрою REF 615 (PO4 на платі X100);

○ після спрацювання реле розриває своє живлення, щоб уникнути пошкоджень котушки.

Реле КНЗ:

○ вказівне реле КНЗ спрацьовує при аварійному відключенні вимикача через захисти по напрузі або частоті;

○ наприклад, при зниженні напруги або автоматичному частотному розвантаженні, коли частота мережі опускається нижче заданої уставки.

○ у таких випадках вказівне реле КНЗ сигналізує про проблему, спрацьовуючи на відповідний сигнал.

Переваги використання вказівних реле полягають у наступному:

- вказівні реле є фізичними елементами і забезпечують швидке реагування на аварійні події;
- це особливо корисно, коли на підстанції є черговий персонал, який може оперативно прийняти необхідні заходи для усунення проблеми.

3.15 Сигнальна лампа HLW та її роль на лабораторному стенді

На лабораторному стенді присутня сигнальна лампа **HLW**, яка інформує про те, що вказівне реле не підняте. Використання цієї лампи пояснюється тим, що черговий персонал може побачити світловий сигнал раніше, ніж спрацює саме вказівне реле (рис. 3.14).

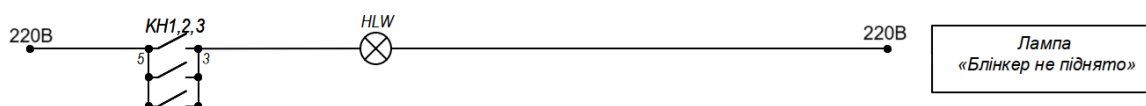


Рисунок 3.14 – Функціональний блок сигнальної лампи вказівного реле

Коли черговий персонал бачить, що лампа HLW засвічена, він негайно підходить до комірки 10 кВ та починає з'ясовувати, яке саме вказівне реле сигналізує про аварійне відключення.

Схема функціонує таким чином: нормально відкриті контакти вказівних реле **КН1**, **КН2** та **КН3** паралельно з'єднані між собою. Коли одне з реле спрацьовує, воно подає напругу на живлення лампи **HLW**, що дозволяє черговому персоналу швидко зреагувати.

3.16 Вимірювальні кола

Аналогові входи напруги та струму в мікропроцесорному реле **REF615** мають важливе значення для вимірювання вторинних струмів і напруг, що використовується для контролю стану обладнання, аналізу навантажень та спрацьовування захисту (рис. 3.15). Ці входи виведені на клемники X0, які включають як напругові, так і струмові кола вимірів та мають наступні характеристики.

Напругові входи. Номінальна напруга для цих входів варіюється в межах ~60...210 В, що дозволяє здійснювати вимірювання в різних режимах роботи при змінному струмі. Для забезпечення коректної роботи пристрій витримує напругу ~240 В на довгий час і до ~360 В протягом 10 секунд.

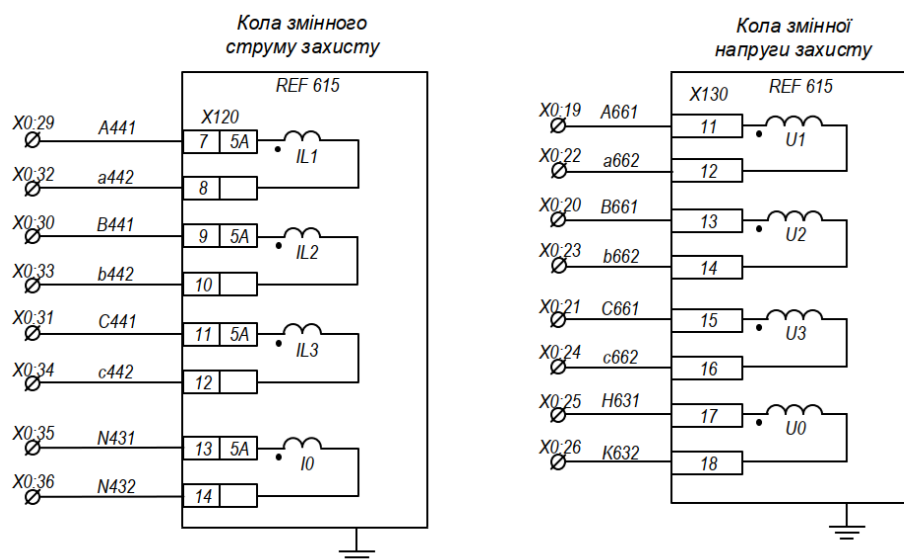


Рисунок 3.15 – Вимірювальні кола для пристрою REF615

Струмові входи. Номінальний струм для струмових входів складає 0,2/1 А для різних варіантів вимірів. Вони мають термічну стійкість до тривалого впливу до 4 А і до 100 А на короткий період часу (1 с). Вимірювання здійснюється з

високою точністю, що дозволяє відстежувати струми до 250 А під час роботи пристрою.

Кола вимірів напруги та струму використовуються для:

- *вимірювання вторинного струму* - вимірювання вторинних струмів необхідне для точного визначення стану електричної мережі, для виявлення можливих перевантажень або коротких замикань. Це дозволяє мікропроцесорному реле REF 615 точно реагувати на зміни і забезпечити захист;

- *контролю і захисту* - напругові та струмові кола використовуються для контролю навантажень на обладнанні, що важливо для коректної роботи системи. Якщо виникає аварійна ситуація або перевантаження, ці кола допомагають виявити проблему і забезпечити своєчасне відключення, мінімізуючи ризик пошкоджень;

- *захисту при аваріях* - сигнали, що надходять з цих вимірювальних кіл, взаємодіють із системою контролю і захисту мікропроцесорного реле, дозволяючи надавати команди на вимкнення або вмикання вимикачів, таким чином запобігаючи потенційним поломкам чи аваріям.

В табл. 3.1 приведено основні значення вимірювальних параметрів.

Таблиця 3.1 - Основні значення вимірювальних параметрів

Параметр	Значення
Номінальна частота	50/60 Гц
Струмові входи	0,2/1А / 1/5 А
<u>Термінальна стійкість:</u>	
Довготривала	4 А
Впродовж 1 с	100 А
<u>Динамічна стійкість до струму:</u>	
Значення за півперіод	250 А
Вхідне повне опір	< 100 мОм
<u>Входи напруги:</u>	
Номінальна напруга	~60...210 В
<u>Стійкість по напрузі:</u>	
Довготривала	~240 В
Впродовж 10 с	~360 В
Навантаження при номінальному напрузі	< 0,05 ВА

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 REF-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 REF-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 REF-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).

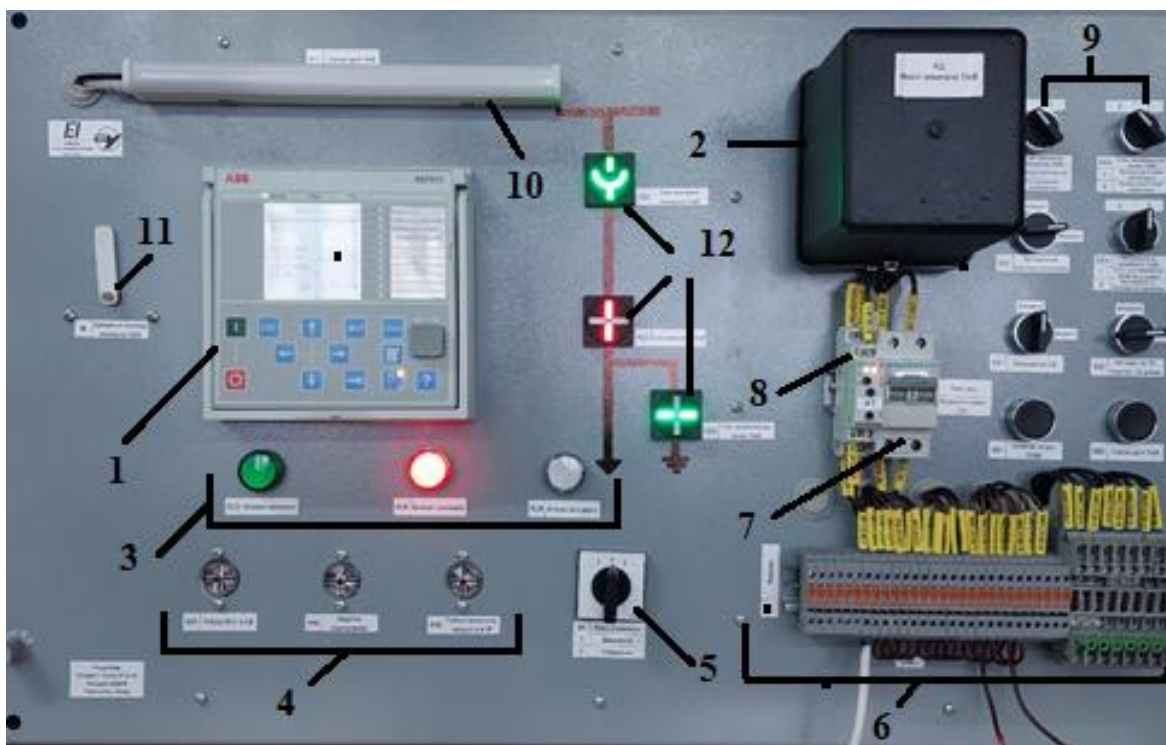


Рисунок 4.1 – Стенд мікропроцесорного релейного захисту:

1- пристрій REF 615; 2 – макет вимикача 10 кВ; 3 – світлові індикатори;
4 – блінкери; 5 – вимикач роботи пристрій REF 615; 6 – комутація електричних кіл стенду; 7 – вимикач живлення стенду; 8 – реле часу; 9 – імітатори режимів роботи стенду; 10 – імітатор електричної дуги; 11 – імітатор електроприводу;
12 – індикатори стану вимикача і шини заземлення

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 загораються, то в лабораторії передбачені засоби пожежогашіння [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 REF-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 струмо-

вого 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.

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

Знаходимо необхідну кількість вертикально забитих електродів

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

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 огорожень 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 REF 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 адапції 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. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем : навч. посіб. / Віктор Павлович Кідиба. – Львів : Львів. політехніка, 2015. – 504 с
2. Яндульський О.С., Дмитренко О.О., Касьянов Г.П. Релейний захист електричних систем. Мікропроцесорні пристрої релейного захисту і автоматики електроенергетичних систем: навч. посіб. 72 с., 2007 р.
3. Компоненти автоматики і телемеханіки [Електронний ресурс] // Електросвіт. – Режим доступу: <http://www.es.ua>. – Назва з екрана.
4. Грищук Ю.С. Аналіз надійності мікропроцесорних пристроїв релейного захисту / Ю.С. Грищук, Р.Ф. Тимошенко // Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ" : зб. наук. пр. Темат. вип. : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2010. – № 16. – С. 21-28.
5. 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).
6. Рубаненко О.Є. Релейний захист та автоматика електричних станцій : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Рубаненко О. Є., Рубаненко О.О., Гунько І.О. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 1251с.
7. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – Ч. 1. – 250 с., рис. 41, табл. 20. ISBN
8. Кутін В.М. Засоби діагностування релейного захисту та автоматики електроенергетичних систем : навчальний посібник / В.М. Кутін, М.В. Кутіна, М.О. Ілюхін. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 120 с.
9. Релейний захист і автоматика енергетичних систем / В.Н. Баженов, К.В. Ушаповський, О.Г. Гриб, Д.А. Олефір, В.І. Васильченко, А.Д. Светелік, Ю.В. Владіміров, Д.А. Гапон, Н.Н. Одегов, Т.С. Ієрусалимова, Н.В. Рудевич. – Харків : «Типографія Мадрид», 2015. – 340 с.
10. Оробчук Б.Я., Корягін М.М. Підвищення достовірності контролю роботи обладнання релейного захисту і автоматики / Матеріали XI Міжнародної науково-

практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій». — Тернопіль: ТНТУ, 2022 р..

11. Лут М.Т., Наливайко В.А., Радько І.П. Діагностування енергетичного обладнання: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. – 2-е вид., перероб. і доп. К.: Вид – во ТОВ «Аграр Медіа Груп», 2014. – 590 с.

12. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник. Ч. 2 / укл.: Д.П. Козярьський, Е.В. Майструк, І.П. Козярьський. Чернівці: Чернівецький нац. ун., 2019. 133 с.

13. Дяченко М.Д. Цифровий захист (апаратне і алгоритмічне забезпечення): навчальний посібник / М.Д. Дяченко, С.К. Піднебenna. – Маріуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2014. – 204 с.

14. Релейний захист та кібербезпека енергетичних систем: підручник / Є.І. Сокол, О.Г. Гриб, В.П. Старенький, О.Ю. Заковоротний, В.М. Баженов, Ю.В. Владимиров, А.Л. Єрохін, С.Ю. Шевченко, С.В. Швець, Д.А. Гапон, М. М.Одєгов, Н.В. Рудевіч, І.Т. Карпалюк, Т.С. Донецька; під заг. ред. Сокола Є.І.). – Харків : ФОП Панов О.М., 2019. – 390 с.

15. Махлін П.В., Костенко С.Ю., Кузьменко О.П. Інтелектуальні пристрої релейного захисту та автоматики: навч. посібник. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. 256 с.

16. Технічне обслуговування мікропроцесорних пристроїв релейного захисту, протиаварійної автоматики, електроавтоматики, дистанційного керування та сигналізації електростанцій і підстанцій від 0,4 кВ до 750 кВ. Правила СОУ – Н ЕЕ35.514:2007.

17. Рудевіч Н.В. Професійні задачі інженерної діяльності з релейного захисту енергосистем (на основі каузального навчання): навч.- метод. посіб. / Н.В. Рудевіч, О.Г. Гриб. – Харків: НТУ «ХПІ», 2017. – 94 с

18. Комплексне оснащення підстанцій пристроями РЗА. URL: <https://rzasystems.com?lang=ua#підстанція-3510-кв-розширена> (дата звернення 04.12.2024)

19. Мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики TPU220 та TPU420. URL: <https://www.sea.com.ua/> (дата звернення 04.12.2024)

20. Sepam серії 80. Пристрої захисту для застосувань високої складності. URL: [https:// \[https://www.se.com/ua/uk/product-range/935-sepam_serii-80/#products\]\(https://www.se.com/ua/uk/product-range/935-sepam_serii-80/#products\)](https://www.se.com/ua/uk/product-range/935-sepam_serii-80/#products) (дата звернення 04.12.2024)
21. Цифрові пристрої релейного захисту та автоматики. URL: <https://www.siemens.com/ua/uk/produkty/enerhetyka/avtomatizatsiya-intelektualni-merezhi/tsyfrovyy-releynyy-zakhyst/siprotec5.html> (дата звернення 05.12.2024)
22. Пристрої захисту приєднань 6-35 кВ МРЗС-05. URL: <https://uis.zp.ua/product/пристрої-захисту-приєднань-6-35-кв-мрзс-05/> (дата звернення 05.12.2024)
23. Мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики для об'єктів енергетики 6-35-110 кВ. URL: <https://reلسis.ua/ua/products/relay-protection-automation> (дата звернення 05.12.2024)
24. Релейний захист і автоматика. URL: <https://www.hartron-incor.com.ua/pза> (дата звернення 05.12.2024)
25. Пристрій управління і захисту фідера REF615 (IEK). URL: https://voltline.ua/obladnannya-serednoyi-naprugy/element.php?ELEMENT_ID=64696&srsId=AfmBOorgxg5smavp-VoGHaVQscH_786jLtJmKgpVLUVZ32_z3flukN68 (дата звернення 05.12.2024)
26. Баженов В.М. Швидкодіючий релейний захист вузлових схем живлення розподільних мереж / В.М. Баженов, М.М. Одегов // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту.– Харків, 2015. – Вип. 153. – С 73 – 79.
27. Кириленко А.В. Відкриті розподілені інформаційно-керуючі системи електроенергетичних об'єктів / А.В. Кириленко, В.В. Рункович // Автоматизація і релейний захист в енергосистемах. - К.: Ін-т електродинаміки НАН України. - 2008.- С.24-33.
28. Оробчук Б., Сисак І., Бабюк С. Автоматизована система релейного захисту від замикань на землю // Вісник ТНТУ. – 2012. – Том 64. – №2. – с. 194-204. – (приладобудування та інформаційно-вимірювальні технології).
29. Методика та організація наукових досліджень : Навч. посіб. / С.Е. Важинський, Т.І. Щербак. – Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. – 260 с.

30. Пристрій захисту, управління та автоматики лінії REF615. Керівництво по продукту. URL: https://library.e.abb.com/public/9774918f7bad4c6cae4c34c64667fdfe/REF615_pg_756233_RUd.pdf
31. Orobchuk Bogdan, et al. 2017 "Development of simulator automated dispatch control system for implementation in learning process." 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). Vol. 1. IEEE, 2017
32. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання «Безпека в надзвичайних ситуаціях» / В.С. Стручок –Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., –156 с. Отримано з <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39196>
33. Закон України «Про охорону праці». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/>
34. Ткачук К.Н., Зацарний В.В., Третьякова Л.Д., Мітюк Л.О. Охорона праці і промислова безпека: навчальний посібник. Київ: Лібра, 2010. - 425 с.
35. ПУЕ - Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання)/ Наказ від 21.07.2017 № 476 Про затвердження Правил улаштування електроустановок
36. Бондаренко О.В., Іоргачов Д.В.. Дослідження опорів заземлювальних пристроїв у неоднорідній землі // Методичне керівництво до лабораторної та навчально-дослідницької роботи студентів. – Одеса, 2003
37. Правила експлуатації електрозахисних засобів. Вид. офіц. Київ: Міністерство енергетики, 2002. 46 с.
38. Коваль В.П. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого рівня вищої освіти за ОПП Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ В.П. Коваль, М.Г. Тарасенко, О.А. Буняк, Л.Т. Мовчан – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 51 с.
39. Оробчук Б.Я., Буняк О.А., Бабюк С.М., Сисак І.М., Вакуленко О.О. Методичні вказівки щодо виконання та оформлення дипломної роботи за ступенем «магістр». Тернопіль, ТНТУ імені Івана Пулюя, 2017 р.