

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
Інститут (факультет ) \_\_\_\_\_ ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ Електропостачання і енергоменеджменту \_\_\_\_\_

«До захисту в ЕК»

«До захисту допущено»

Директор інституту

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій БЛАЖЕНКО  
(підпис) (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_ Сергій БАЛЮГА  
(підпис) (прізвище та ініціали)

« \_\_\_ » \_\_\_ лютого 2023 р.

« \_\_\_ » \_\_\_ лютого 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» \_\_\_\_\_  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми \_\_\_\_\_ «Електротехнічні системи електроспоживання» \_\_\_\_\_

на тему: «Технології віртуального тестування релейного захисту»

Виконала: здобувачка 2 курсу, групи ЗЕЛ-2-5М

\_\_\_\_\_ Туранська Тетяна Володимирівна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ Куєвда Юлія Валеріївна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_ Володимир Бондар \_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали) (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) недозволеної допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувачка \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2023 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Навчально - науковий інженерно - технічний інститут ім. акад. І. С. Гулого

Кафедра Електропостачання і енергоменеджменту

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні системи електроспоживання»  
(назва)

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри ЕПЕМ

/Балюта С. М./

“11” листопада 2022 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Туранській Тетяні Володимирівні  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Технології віртуального тестування релейного захисту»  
керівник роботи Куєвда Юлія Валеріївна, к.т.н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 11 ” листопада 2022 року № 810-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 10 лютого 2023 року

3. Вихідні дані до роботи матеріали переддипломної практики

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

1. Дослідити та зробити аналіз сучасних методів перевірки пристроїв захисту, в режимах замкненого та розімкнутого контурів. 2. Дослідити алгоритм та можливості віртуальних тестувань захисту і застосувати до двигуна мережі 6 Кв. 3. Віртуально протестувати три найпоширеніші функції захисту (МСЗ, струмова відсічка, максимальна напруга) та за допомогою програми Easergy Pro розрахувати дійсні уставки спрацювання. 4. Відстежити збої живлення шляхом відтворення файлів COMTRADE.

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація до пояснювальної записки – 32 слайди.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 11 листопада 2022 р. \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на магістерську роботу.	11.11.2022 р.	
2	Огляд літературних джерел. Аналіз сучасних методів перевірки пристроїв релейного захисту, в режимах замкненого та розімкнутого контурів.	12 - 18.11.2022 р.	
3	Дослідження алгоритму та можливостей віртуальних тестувань захисту і застосувати до двигуна мережі 6 Кв.	19.11.22-10.12.22	
4	Віртуальне тестування трьох найпоширеніших функцій захисту (МСЗ, струмова відсічка, максимальна напруга) та за допомогою програми Easergy Pro розрахунки дійсних уставок спрацювання.	11.12.22-05.01.23	
5	Відстеження збоїв живлення шляхом відтворення файлів COMTRADE.	06.01.23-12.01.23	
6	Формулювання рекомендацій та висновків	13.01.23-18.01.23	
7	Оформлення пояснювальної записки	19.01.23-28.01.23	
8	Оформлення графічної частини роботи (презентації)	29.01.23-09.02.23	
9	Подання готової роботи для перевірки на плагіат	10.02.2023 р.	

**Здобувач**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Туранська Т.В.**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Куєвда Ю.В.**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Туранська Т. В. " Технології віртуального тестування релейного захисту "  
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Національний університет харчових технологій

Київ 2023

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра складається із пояснювальної записки та презентації. Пояснювальна записка виконана на 89 сторінках формату А4, яка включає в себе 52 рисунка, 2 таблиці, 37 джерел використаної літератури.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра присвячена питанню застосування технологій віртуального тестування засобів релейного захисту в електричних мережах.

Можливість підвищення ефективності управління захистом мережі та її елементів за рахунок вдосконалення системи, шляхом впровадження цифрових технологій, а саме застосування цифрових реле під час віртуального тестування схеми захисту.

В даній роботі наведено способи віртуального тестування з розімкненим та замкненим контуром, можливості їх застосування та властивості. Розглядаються варіанти віртуальних тестувань з реальними реле та цифровою мережею, а також коли реле та мережа віртуальні. Приведено приклади від відомих світових виробників, детальний опис, характеристики, переваги. Можливість зберігання, моделювання даних за використання файлу COMTRADE.

Досліджується алгоритм віртуального інжекційного тестування реле Easergy P3 від Schneider Electric для моделювання випадків аварійної роботи обладнання при заданих значеннях вимірювань (струму, напруги) та можливості візуалізації цих випадків графічно.

Ключові слова: ВІРТУАЛЬНИЙ РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ, ЦИФРОВЕ РЕЛЕ, СТУПЕНІ ЗАХИСТУ, СТРУМ, НАПРУГА.

## ANNOTATION

Turanska T. V. "Technologies of virtual testing of relay protection"

141 "Electric power, electrical engineering and electromechanics"

National University of Food Technologies

Kyiv 2023

The qualification work for the master's degree consists of an explanatory note and a presentation. The explanatory note is made on 89 pages of A4 format, which includes 52 figures, 2 tables, 37 sources of references.

The qualification work for obtaining an education degree is devoted to the issue of the application of technological virtual testing of means of relay protection in electrical networks.

The possibility of increasing the efficiency of managing the protection of the network and its elements due to the improvement of the system, through the introduction of digital technologies, namely the use of digital relays during virtual testing of protection schemes.

This paper presents random open-loop and closed-loop virtual testing, their applications and properties. Virtual testing with real relays and a digital network is considered, as well as when the relays and network are virtual. There are examples from well-known global manufacturers, a detailed description, characteristics, advantages. Ability to store, model data to use COMTRADE file.

The algorithm of virtual injection testing of the Easergy P3 relay from Schneider Electric is tested for the simulation of emergency equipment at given measurement values (current, voltage) and the possibility of visualizing these graphic images.

Keywords: VIRTUAL RELAY PROTECTION, DIGITAL RELAY, LEVELS OF PROTECTION, CURRENT, VOLTAGE.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	8
ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ .....	10
РОЗДІЛ 1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ.....	12
1.1. Характеристика цифрових пристроїв релейного захисту.....	12
1.2. Загальна структурна схема цифрового захисту.....	12
1.3. Перетворення та зберігання інформації в цифрових пристроях РЗ.....	15
1.4. Переваги цифрових пристроїв РЗ.....	16
1.5. Розвиток від електромеханічних до цифрових пристроїв РЗ.....	18
РОЗДІЛ 2. ЦИФРОВІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ВІРТУАЛЬНОГО ТЕСТУВАННЯ РЗ. ....	20
2.1. Установка OMICRON CMC 356.....	20
2.1.1. Характеристики випробувальної установки OMICRON CMC 356.....	20
2.1.2. Перетворення сигналів у цифрові значення.....	21
2.1.3. Налаштування програмних можливостей до установки CMC 35.....	21
2.1.4. Пакети програмного забезпечення OMICRON.....	25
2.1.5. Віртуальне тестування РЗ з пакетом RelaySimTest.....	25
2.1.6. Можливості тестування РЗ в режимі розімкнутого контуру.....	27
2.2. Цифровий програмно-апаратний комплекс RTDS.....	28
2.2.1. Характеристики комплексу RTDS.....	28
2.2.2. Відповідність RTDS міжнародним стандартам.....	29
2.2.3. Модульна конструкція симулятора RTDS.....	31
2.2.4. Функції карти керування зв'язком між RTDS і ПК.....	31
2.2.5. Обробка часових кроків в RTDS за алгоритмом Доммеля.....	31
2.2.6. Можливості модулів RSCAD.....	34
2.2.7. Застосування комплексів RTDS закордонними підприємствами.....	36
2.3. Реле Easergy P5 з вбудованим віртуальним інжектором.....	37
2.3.1. Характеристики пристрою захисту Easergy P5.....	37

2.3.2 Функціональні можливості програмного забезпечення до Easergy P5....	38
2.3.3. Умови для проведення віртуального інжекційного тестування.....	39
2.3.4. Моделювання віртуального інжекційного тестування.....	40
2.3.5. Варіанти зв'язку для підключення та налаштування реле Easergy P5 за допомогою програмного забезпечення.....	41
2.3.6. Протоколи резервування для підключення та налаштування реле Easergy P5 за допомогою програмного забезпечення.....	45
<b>РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЗАХИСТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІРТУАЛЬНОГО ІНЖЕКЦІЙНОГО ТЕСТУВАННЯ.....</b>	<b>48</b>
3.1. Концепція цифрових двійників.....	48
3.1.1. Застосування цифрових двійників.....	48
3.1.2. Цифрові двійники мережі.....	49
3.1.3. Файли COMTRADE, їх можливості.....	53
3.1.4. Кроки тестувань.....	55
3.1.5. Що можна перевірити в режимі розімкненого контуру.....	56
3.1.6. З чим можна перевірити метод розімкненого контуру.....	60
3.2. Реле Easergy P3U30 та його функції.....	63
3.2.1. Можливості налаштувань в програмі Easergy Pro.....	67
3.2.2. Віртуальне інжекційне тестування Easergy P3U30.....	74
Висновки до третього розділу.....	84
<b>ВИСНОВОК.....</b>	<b>85</b>
<b>ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>86</b>

## ВСТУП

В загальному комплексі засобів автоматизації, призначених для підвищення якості виробництва електроенергії й забезпечення безперебійного електропостачання споживачів, головне місце займає техніка релейного захисту. Попереджуючи розвиток аварій, запобігаючи можливості поширення впливу пошкоджень на всю систему релейний захист разом із пристроями електроавтоматики й телемеханіки є важливою ланкою в технічному оснащенні енергосистем.

Бурхливий розвиток мікроелектроніки в 70-х і 80-х роках дозволив докорінно змінити підхід до побудови систем релейного захисту. За останні десятиліття мікропроцесорні захисти замінили електромеханічні реле на переважній більшості об'єктів енергетики, промисловості та розподільчих пристроїв. З'явилися різні цифрові інтегральні схеми середнього й високого ступеня інтеграції, а також різноманітні прецензійні аналогові ІС. Сучасні цифрові ІС реалізують функції цілих блоків і вузлів обчислювальних пристроїв, мають високу швидкодію, що обумовило появу зовсім нового напрямку в електроніці - створення мікропроцесорів, що істотно розширило можливості, як практичної реалізації розроблених методів обробки сигналів, так і подальшого розвитку релейного захисту на їхній основі.

Останніми роками в енергосистемах України широко впроваджуються пристрої релейного захисту, виконані за цифровими принципами. За кордоном такі пристрої використовуються вже протягом більше двох десятиків років. Тому не дивно, що закордонні фірми, які займаються розробкою цифрових пристроїв релейного захисту та автоматики, мають суттєву перевагу порівняно з вітчизняними виробниками подібної техніки.

Найбільш відомими лідерами світу у виробництві пристроїв релейного захисту та автоматики є європейські компанії ABB, SIEMENS, ALSTOM, SCHNEIDER ELECTRIC. З вітчизняних виробників відносяться науково-виробниче підприємство (НВП) «ХАРТРОН-ІНКОР», науково-виробниче

підприємство «РЕЛСіС», виробниче об'єднання «КИЇВПРИЛАД», компанія «РЗА СИСТЕМЗ». [ 11]

Розробка і впровадження вітчизняних МП РЗА для більш високих класів напруг ведеться, проте, мова йде про окремі пристрої, а не про повну систему релейного захисту й автоматики електричної підстанції 220 - 750 кВ, що у даний час може бути забезпечено тільки закордонною фірмою виробником. Тому комплексний характер проблеми й особливості існуючого стану електроенергетики України і РЗА зокрема, потребують розв'язання зазначених проблем шляхом розробки методів і засобів підвищення ефективності функціонування вітчизняних МП РЗА різноманітних класів напруг . [2]

Для обслуговування МП-пристроїв необхідно мати на енергетичному об'єкті осіб, які займаються експлуатацією мікропроцесорних пристроїв, відповідної комп'ютерної техніки, а також проводити навчання обслуговуючого персоналу, щоб люди володіли певними навиками. На сьогодні нестача кваліфікованого персоналу є основним недоліком впровадження цифрової техніки в Україні.

Саме тому метою даної роботи є:

- 1) Проаналізувати сучасні методи перевірки пристроїв релейного захисту, в режимах замкненого та розімкнутого контурів.
- 2) Дослідити алгоритм та можливості віртуальних тестувань захисту і застосувати до двигуна мережі 6 Кв.
- 3) Віртуально протестувати три найпоширеніші функції захисту (МСЗ, струмова відсічка, максимальна напруга) та за допомогою програми Easergy Pro розрахувати дійсні уставки спрацювання.
- 4) Відстежити збої живлення шляхом відтворення файлів COMTRADE.

**ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

ТА - трансформатор струму

TV - трансформатор напруги

TAL – проміжний трансформатор струму

TVL – проміжний трансформатор напруги

АВР – автоматичне ввімкнення резерву

АПВ – автоматичне повторне ввімкнення

ПРВВ – пристрій резервування відмови вимикачів

ПЗП - постійний запам'ятовуючий пристрій

ОЗП - оперативний запам'ятовуючий пристрій

ППЗП - постійний програмований запам'ятовуючий пристрій

РЗ – релейний захист

РЗА - релейний захист та автоматика

МП – мікропроцесорні

ТС – трансформатор струму

ЛЕП – лінії електропередач

ПУ – перевірна установка

ПЗ – програмне забезпечення

ПК – портативний комп'ютер

ЛМІ – людино-машинний інтерфейс

GPS - система глобального позиціонування (Global Positioning System)

LPCT - трансформатори струму малої потужності (low-power current transformers)

LPVT - трансформатори напруги малої потужності (low-power voltage transformers)

DSP - цифрова обробка сигналів (Digital Signal Processing)

HMI - людино-машинний інтерфейс (Human Machine Interface)

SCADA - диспетчерське управління і збір даних (Supervisory Control And Data Acquisition)

RSTP - швидкий протокол основного дерева (Rapid Spanning Tree Protocol)

PRP - протокол паралельного резервування (Parallel Redundancy Protocol)

IED - інтелектуальні електронні пристрої (Intelligent Electronic Devices)

GOOSE - протокол передачі даних про події на підстанції (Generic Object Oriented Substation Event)

## РОЗДІЛ 1. ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

### 1.1. Характеристика цифрових пристроїв релейного захисту.

Одним з головних елементів багатьох пристроїв релейного захисту та автоматики є мікропроцесор. Та існують пристрої, які створені на основі мікроконтролерів. Створено складніші пристрої релейного захисту, автоматики, що об'єднані в спільну інформаційну мережу, для організації якої використовують комп'ютери з потужними процесорами. Спільне у всіх цих технічних елементах є використання цифрових принципів їхнього функціонування. Саме тому можна всіх їх можна віднести до цифрових пристроїв релейного захисту.

### 1.2. Загальна структурна схема цифрового захисту.

Вони усі, незалежно від призначення цифрових пристроїв релейного захисту – струмові, дистанційні та інші мають схожу структуру (Рис.1).

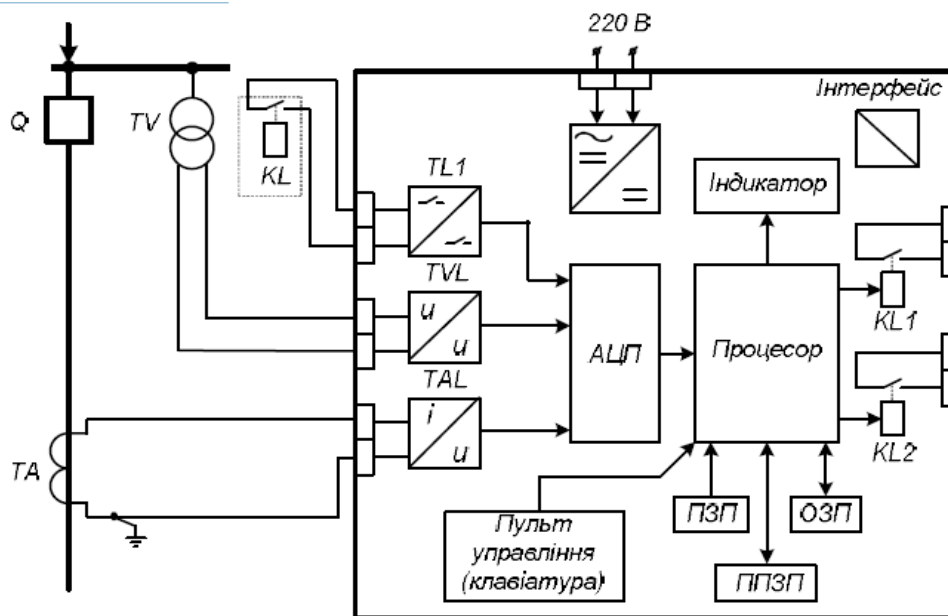


Рисунок 1. Загальна структурна схема цифрового захисту

Основним елементом цифрового захисту є процесор, на ньому реалізований алгоритм роботи конкретного захисту. Процесорів може бути один або кілька. Але багатопроцесорні системи, в яких кожен процесор виконує конкретні завдання алгоритму і ці процесори працюють паралельно, являються

більш точними та швидкодіючими. Однопроцесорні системи потребують більш потужних процесорів. Оскільки експлуатація пристроїв релейного захисту іноді відбувається в неопалювальні приміщеннях, то застосовують спеціальні процесори так званого індустріального виконання, які можуть працювати в умовах зниженої/підвищеної температури та завищеної вологості.

Процесор має зв'язок з об'єктом захисту через кола введення – виведення. Вхідною інформацією є, зазвичай, аналогові сигнали – струми, напруги, температура тощо та бінарні (двійкові) – положення комутаційних апаратів, стан вихідних реле інших пристроїв релейного захисту та автоматики тощо.

Вихідними сигналами цифрових захистів, як і інших захистів, є традиційно бінарні сигнали. Ці сигнали поступають після спрацювання цифрового захисту в кола управління та в кола сигналізації.

Контрольовані напруги та струми неперервні в часі аналогові сигнали і можуть приймати на фіксованому відрізку часу будь-які значення в межах, що дозволяє режим роботи електричної мережі. Цифрові пристрої захисту працюють не з аналоговими, а з дискретними (цифровими) сигналами, котрі можуть приймати, на відміну від аналогових сигналів, лише кінцеву множину значень для конкретних моментів часу [21].

Перетворення аналогових сигналів у дискретні називається дискретизація. Пристрій, що робить це перетворення, називається аналого-цифровим перетворювачем (АЦП).

Аналогові сигнали, що контролюють пристрої захисту, – це струм від трансформатора струму ТА та трансформатора напруги TV – підводяться до спеціальних вхідних перетворювачів (на схемі це ТАЛ та TVL). Ці перетворювачі призначені для гальванічної розв'язки пристрою від зовнішніх кіл (трансформаторів струму та трансформаторів напруги), а також щоб отримати нормовану напруги на виході та перетворити її за допомогою АЦП в цифрові сигнали.

Сигнали від трансформаторів струму ТА та напруги TV подаються на первинні обмотки проміжних трансформаторів ТАL та TVL. На вторинних обмотках цих трансформаторів відповідно струм та напруга перетворюються в напруги, пропорційні відповідно величині струму та напруги. Для того, щоб імпульсні сигнали, які можуть виникати у вторинних колах трансформаторів струму та напруги, не попадали в електронну частину цифрового пристрою та не пошкоджували його, між первинною та вторинною обмотками проміжних трансформаторів ТАL та TVL встановлюють екран.

Щоб електронних блоків цифрового пристрою захистити від перенапруг паралельно до вторинних обмоток проміжних трансформаторів ТАL та TVL встановлюють варистори, іноді стабілітрони. Щоб вторинну напругу на виході проміжних трансформаторів узгодити з вхідними сигналами пристрою АЦП існують змінні опори. Для правильної роботи Для непопадання високочастотного спектра сигналу на АЦП, приміняють високочастотний фільтр. Під час реалізації алгоритму функціонування захисту додатково здійснюється цифрова фільтрація сигналу. Вихідні сигнали вихідної напруги з вхідних перетворювачів ТАL та TVL поступають на вхід АЦП. [22]

При переході від аналогового неперервного сигналу до дискретного відбувається часткова втрата інформації. Це пояснюється тим, що АЦП здійснює перетворення вхідного аналогового сигналу в дискретний через деякі часові проміжки  $\Delta t$ , а між ними значення вхідного сигналу не контролюється. Чим менший цей часовий проміжок, тим точніше відтворюється аналоговий сигнал у цифровій формі.

Щоб захист працював вірно, крім аналогових сигналів, необхідно мати також інформацію про бінарні сигнали від інших пристроїв релейного захисту та автоматики, положення комутаційних апаратів тощо. Наприклад, з метою реалізації функції АПВ, ПРВВ необхідно мати інформацію про стан вимикача, на який діє даний захист, для прискорення дії даного захисту за командою від захисту шин необхідно мати інформацію від вихідних кіл захисту шин та інших. Бінарний сигнал від зовнішнього пристрою (умовно зображений у

вигляді зовнішнього реле KL) подається на вхідний перетворювач бінарних сигналів TL1.

### **1.3. Перетворення та зберігання інформації в цифрових пристроях РЗ.**

У процесорі цифрові сигнали від АЦП, обробляються за певним алгоритмом, прописаним у вигляді програми. Ця програма зберігається в постійному запам'ятовуючому пристрої (ПЗП) (ROM – Read Only Memory – лише для читання). Він являє собою запам'ятовуючий пристрій з енергонезалежною пам'яттю, тобто інформація в ньому зберігається навіть тоді, коли пристрій вимкнений від зовнішнього живлення.

Для зберігання результатів проміжних обчислень використовують оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) (RAM – Random Access Memory – пам'ять з „випадковим” доступом). ОЗП дуже швидкодіючий, але після вимкнення зовнішнього живлення, не зберігає інформацію. Уставки спрацювання захистів, які мають змінюватися в процесі експлуатації, зберігаються в постійному програмованому запам'ятовуючому пристрої (ППЗП), який дозволяє змінювати уставки багато разів. При цьому інформація про уставки зберігається після зникнення зовнішнього живлення. [23]

На передній панелі пристрою розміщений пульт управління (клавіатура), керуючи яким можна задавати необхідні режими пристрою та змінювати уставки спрацювання.

Візуально роботу пристрою та уставки можна переглядати на рідкокристалічному індикаторі на передній панелі пристрою.

Коли пристрій спрацював, замикаються вихідні контакти реле KL1 та KL2 [3].

Цифрові захисти не змінюють принципів релейного захисту, але вони розширюють функціональні можливості, скорочують кількість реле, спрощують обслуговування і зрештою знижують його вартість[19].

#### 1.4. Переваги цифрових пристроїв РЗ.

Якщо порівнювати традиційні електромеханічні та напівпровідникові пристрої релейного захисту, цифрові пристрої мають ряд суттєвих переваг. Основними з них є:

- більш висока точність відтворення заданих характеристик функціонування пристрою. У цілому, апаратна похибка цифрових захистів може досягати до 2%. Так, один із основних параметрів вимірювальних засобів захисту – коефіцієнт повернення – може мати значення 0,99. Досягнення такого значення коефіцієнта на напівпровідникових та електромеханічних реле потребує складних технічних рішень;
- отримання характеристик будь-якої складності. Це особливо актуально для дистанційних захистів, вимірювальні засоби яких можуть мати які завгодно характеристики і враховувати будь-які особливості режимів, що можуть виникати в енергосистемі. При цьому зміна форми характеристик не потребує ніяких додаткових технічних переробок – вона змінюється на алгоритмічному рівні;
- запам'ятовування координат режиму під час спрацювання цифрового пристрою. Практично всі цифрові захисти запам'ятовують координати режиму аварійного та доаварійного режиму, що дає змогу експлуатаційному персоналу здійснювати глибокий аналіз аварійних ситуацій, визначати причини аварії і на основі цього при необхідності уточнювати та змінювати характеристики захистів та автоматики;
- можливість змінювати конфігурацію пристрою. У процесі розвитку мережі може виникнути необхідність у зміні характеристик пристроїв захисту – змінити уставки, ввести або вивести з роботи деякі функції тощо. Такі зміни не потребують ніяких технічних витрат, тому що вони здійснюються на програмному рівні;
- значно менші габарити та менші затрати електротехнічних матеріалів. Один невеликий за розміром цифровий пристрій може замінити цілу

групу складних реле, виконаних на напівпровідниках або електромеханічних елементах. Наприклад, напівпровідниковий дистанційний захист типу ПДЕ від міжфазних к.з. має дев'ять вимірювальних дистанційних пристроїв, кожен з яких виконаний у вигляді окремого модуля. В цифровому ж пристрої характеристики всіх цих вимірювальних пристроїв задаються на програмному рівні і реалізуються віртуально в процесорі;

- можливість самодіагностики. Алгоритми функціонування сучасних цифрових пристроїв захисту, особливо складних, обов'язково включають функцію самодіагностики, яка періодично здійснює контроль справності всіх складових пристрою – вхідних кіл, вихідних кіл, цифрових елементів і при виявленні несправностей робота пристрою блокується з автоматичним повідомленням про це черговому персоналу. Традиційні ж пристрої релейного захисту, особливо електромеханічні, такої можливості не мають, і є багато випадків в експлуатації, коли при виникненні аварії ці пристрої не спрацьовували і після аналізу виявлялось, що вони були несправними, про що оперативний персонал і не здогадувався;
- менше споживання енергії для функціонування, що суттєво зменшує потужність джерел енергії оперативного струму;
- менше навантаження та первинні вимірювальні трансформатори струму та напруги. Потужність споживання сучасних цифрових пристроїв релейного захисту складає до 0,5 ВА. Це дає змогу під'єднувати до первинних вимірювальних трансформаторів струму та напруги більшу кількість пристроїв релейного захисту та автоматики, забезпечуючи при цьому роботу трансформаторів струму та напруги в заданому класі точності [24];
- простота в експлуатації. Під час проведення планових профілактичних робіт немає необхідності перевіряти характеристики окремих складових елементів, як у традиційних пристроях релейного захисту, тому що

фізично їх немає, їхні характеристики реалізовані програмно. Тому перевіряються лише загальні характеристики функціонування. Це суттєво зменшує номенклатуру робіт і відповідно час перевірки пристроїв.

Особливістю цифрових пристроїв є універсальність, що більшою мірою стосується розробників, а не експлуатації. Використовуючи універсальний процесорний модуль, відкорегувавши вхідні та вихідні кола, змінюючи алгоритм функціонування, можна створювати різні типи захистів та автоматики.[1]

Конструкція цифрових захистів дає можливість випускати їх в уніфікованому виконанні з однотипним програмним забезпеченням.

### **1.5. Розвиток від електромеханічних до цифрових пристроїв РЗ.**

Одночасно з розвитком захистів удосконалювалися і випробувальні комплекси для перевірки працездатності РЗ: від електромеханічних пристроїв до цифрових МП систем. Випробувальні стенди теж «еволюціонували» від простих наборів випробувальних активних опорів до мікропроцесорних програмно-апаратних випробувальних комплексів.

На підприємствах де переважають електромеханічні реле до цих пір використовують, наприклад, установки ЭУ5000 (Рис.2). Вони призначені для налагодження та перевірки простих релейних захистів та елементів автоматики (реле, контактів, пускачів та ін.). Складається установка з двох блоків ФР5000 (блок регулювальний) і ФМ5000 (блок навантаження). Вони досить громіздкі, маса кожного блоку біля 30 кг.

Також існують інші випробувальні установки для перевірки простих захистів: пульт для тестування захистів ПТ-01 фірми «Енергоавтовін»; комплект додаткового джерела для перевірки захистів великим струмом ПТ01/4А; установка У5052; пристрій РЕТОМ-11; комплектні випробувальні пристрої для перевірки простих захистів «Нептун»; комплектна переносна установка У5053; Установка для перевірки пристроїв РЗА «Уран». [20]



Рисунок 1. Установка ЭУ5000 (з двух блоков: ФР5000 та ФМ5000)

## РОЗДІЛ 2. ЦИФРОВІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ВІРТУАЛЬНОГО ТЕСТУВАННЯ РЗ

### 2.1. Установка OMICRON CMC 356

Великих успіхів досягла австрійська компанія OMICRON, що була заснована у 1984 році. В 1990 році був представлений її продукт: випробувальне обладнання для релейного захисту з пристроєм CMC 56. Компанія почала розробляти компактні та надлегкі установки для випробувань цифрових реле.

#### 2.1.1. Характеристики випробувальної установки OMICRON CMC 356

Зараз на сайті представлена вдосконалена розробка компанії: випробувальна установка OMICRON CMC 356 (Рис.3). Це універсальний пристрій для проведення випробувань захисних реле будь-якого покоління та типу. Він має шість потужних джерел струму ( в трифазному режимі: до 64 А/ 860 ВА на канал) з великим динамічним діапазоном дозволяє використовувати установку для випробувань навіть електромеханічних реле з дуже високою споживаною потужністю; широкий діапазон струмів для випробувань п'ятиамперних реле. Також є можливість виконувати перевірку вторинних ланцюгів трансформаторів струму потужним первинним струмом, що подається від випробувальної установки.[4]



Рисунок 3. Підключення установки OMICRON CMC 356 з програмним забезпеченням до реле через роз'єм технічного обслуговування

### 2.1.2. Перетворення сигналів у цифрові значення

Випробувальні комплекси генерують тестові сигнали відповідно до заданих цифрових значень завдяки використанню технології DSP. З іншого боку, використання способу корекції похибки дозволяє генерувати тестові сигнали високої точності, у разі низької амплітуди. Схемотехніка внутрішніх підсилювачів та використання блоків живлення, що працюють в імпульсному режимі, гарантує максимальні робочі характеристики при мінімальній вазі та об'ємі. Незалежні канали з низькорівневими сигналами розташовані на задній панелі випробувальних комплектів, їх можна використовувати для керування зовнішніми підсилювачами або випробувань реле з наявністю низькорівневого входу. Всі канали налаштовуються безперервно і незалежно за амплітудою, фазою та частотою. Не потрібно перемикаати діапазони. Всі виходи по струму та напрузі захищені від перевантажень, КЗ, перегріву та зовнішніх високовольтних перешкод, викликаних перехідними режимами. [25]

### 2.1.3. Налаштування програмних можливостей до установки СМС 356

Для управління установкою СМС 356 від ПК OMICRON пропонує декілька пакетів програмного забезпечення. В ручному робочому режимі налаштування значень напруги і струму, кут зсуву фаз, частоти можна виконувати або вводячи числа або прямо на векторній діаграмі (Рис.4).

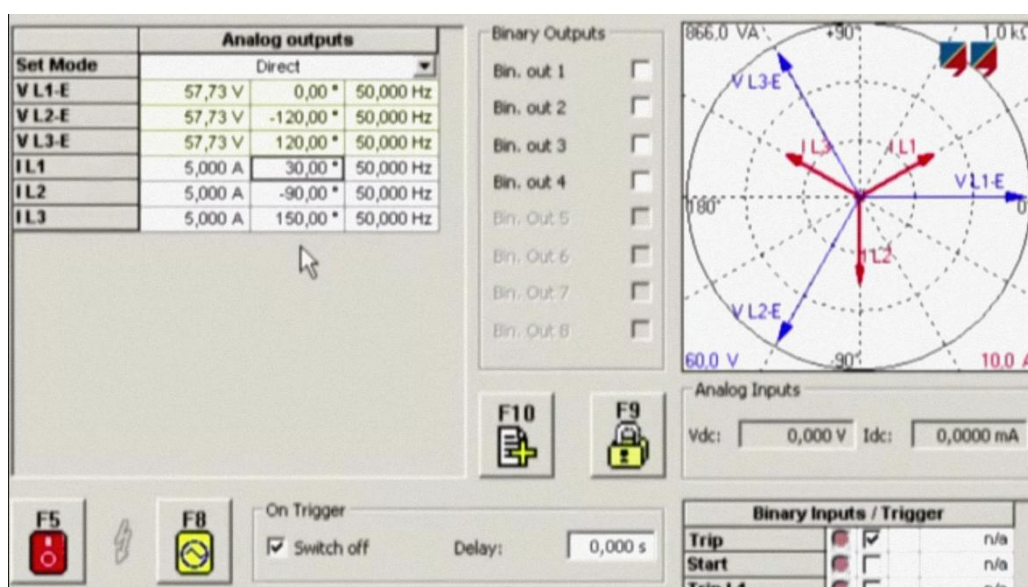


Рисунок 4. Можливість вручну налаштувати параметри чисельно або на векторній діаграмі СМС 356 від ПК OMICRON

Забезпечується відображення стан двійкових входів, що дозволяє виконувати вимірювання часу (Рис.5).






Binary Inputs / Trigger			
<b>Trip</b>		<input checked="" type="checkbox"/>	894,7 ms
<b>Start</b>		<input type="checkbox"/>	n/a
<b>Trip L1</b>		<input type="checkbox"/>	n/a
<b>Trip L2</b>		<input type="checkbox"/>	n/a
<b>Trip L3</b>		<input type="checkbox"/>	n/a
<b>Not used</b>			

Рисунок 5. Вимірювання часових характеристик СМС 356 від ПК OMICRON

Використання крокового та імпульсного режимів дозволяє визначати такі величини як уставки по пуску (Рис.6).

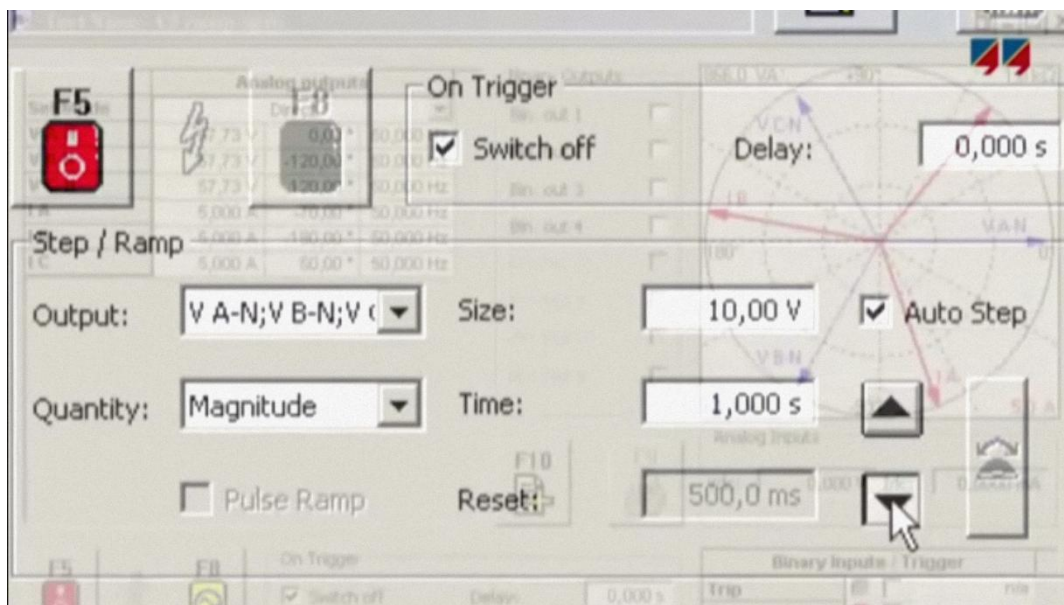


Рисунок 6. Визначення уставок по пуску

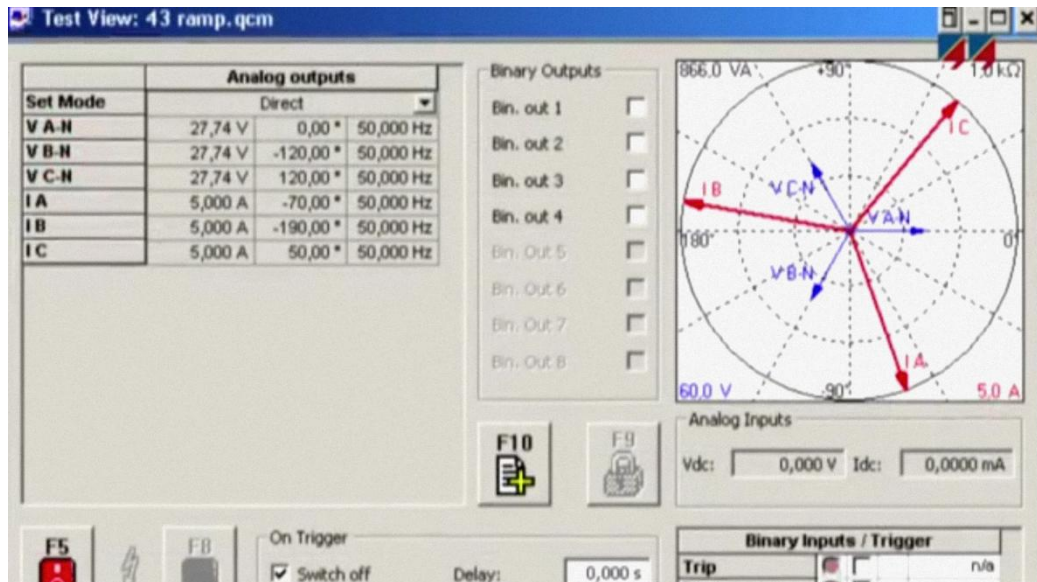


Рисунок 7. Визначення уставок по пуску та їх зміни чисельно і на векторній діаграмі СМС 356 від ПК OMICRON

Для багатьох перевірок необхідні розрахунки таких величин як складові нульової та оберненої послідовності. СМС виконує такі розрахунки, одночасно вносячи зміни на векторній діаграмі (Рис.7).

Також є можливість прямого вводу активної або реактивної потужності, дозволяючи швидко перевіряти датчики потужності та лічильники електроенергії (Рис.8).

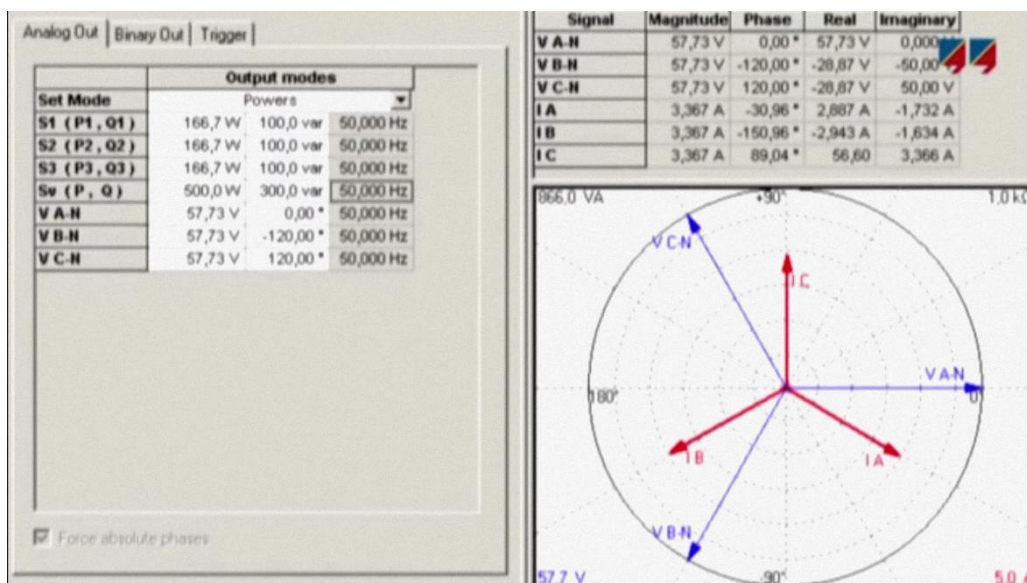


Рисунок 8. Можливість прямого вводу активної та реактивної енергії СМС 356 від ПК OMICRON

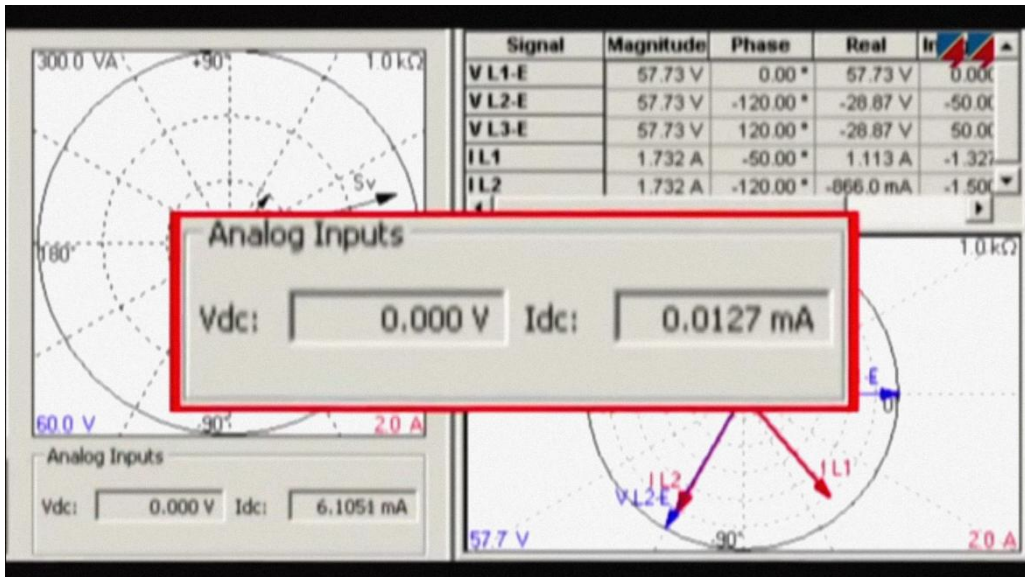


Рисунок 9. Індексуювання вихідних величин постійного струму та напруги від вимірювальних перетворювачів в СМС 356 від ПК OMICRON

Індексуються вихідні величини постійного струму та напруги від вимірювальних перетворювачів (Рис.9).

В якості вихідних значень можна задати також повний опір як абсолютне значення або відносно уставки зони дистанційного реле. Далі СМС прораховує, відображає та видає фазні величини з урахуванням всіх параметрів, в тому числі точки заземлення ТС, номінального струму та ін. (Рис.10).

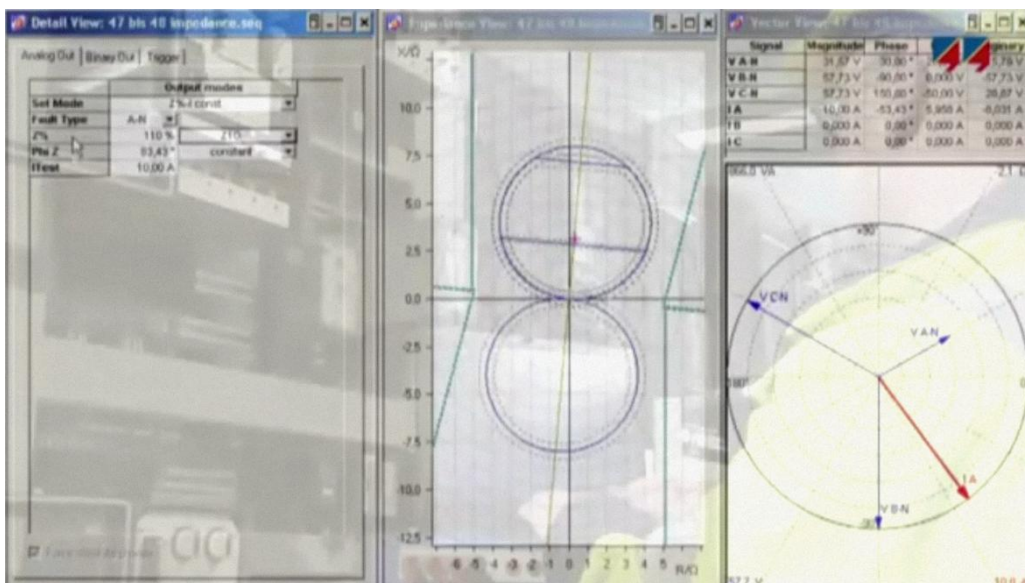


Рисунок 10. Задано в якості вихідних значень повний опір як абсолютне значення і відображення та видача фазних величини з урахуванням всіх параметрів.

#### **2.1.4. Пакети програмного забезпечення OMICRON**

Компанія OMICRON має п'ять пакетів програмного забезпечення до своєї продукції. Базовим є Test Universe для автоматизованих перевірок уставок пристроїв захисту. Це модульне програмне забезпечення суттєво скорочує час випробувань завдяки широкій функціональності та спеціалізованим випробувальним модулям.

А пакет RelaySimTest є новаторським та орієнтований на перспективу. Це програмне забезпечення для комплексних випробувань систем РЗА дозволяє випробовувати реле незалежно від їх типів та виробників. Воно перевіряє правильність роботи системи релейного захисту загалом, реалістично моделюючи події у енергосистемі. Сама велика відмінність полягає в тому, що за допомогою RelaySimTest все тестування можна контролювати з одного кінця лінії, що неможливо зробити з Test Universe, оскільки потрібно керувати кожним СМС окремо.

#### **2.1.5. Віртуальне тестування РЗ з пакетом RelaySimTest**

Всі підключення проводяться на одному кінці лінії, а перевіряються обидва реле включно з каналом зв'язку. RelaySimTest розраховує значення напруги і струму на основі динамічного моделювання мережі, відображаються фактичні параметри лінії (Рис.11,Рис.12). Щоб синхронізувати установки, вони використовують CMGPS 588 - блок синхронізації під управлінням GPS, що легко підключається до випробувальних комплексів за допомогою кабелю Ethernet (Рис.13). На обох сторонах має бути встановлений мобільний доступ до Інтернет. Щоб підключити другу випробувальну установку потрібно ввести ідентифікатор сеансу від віддаленого агента RelaySimTest. Програма розраховує струми і напруги на обох кінцях лінії. Всі дані реле виводяться на екран, як результат випробувань формує звіт (Рис.14). Випробування лінії з виведенням системи захисту проводиться всього одну годину[13].

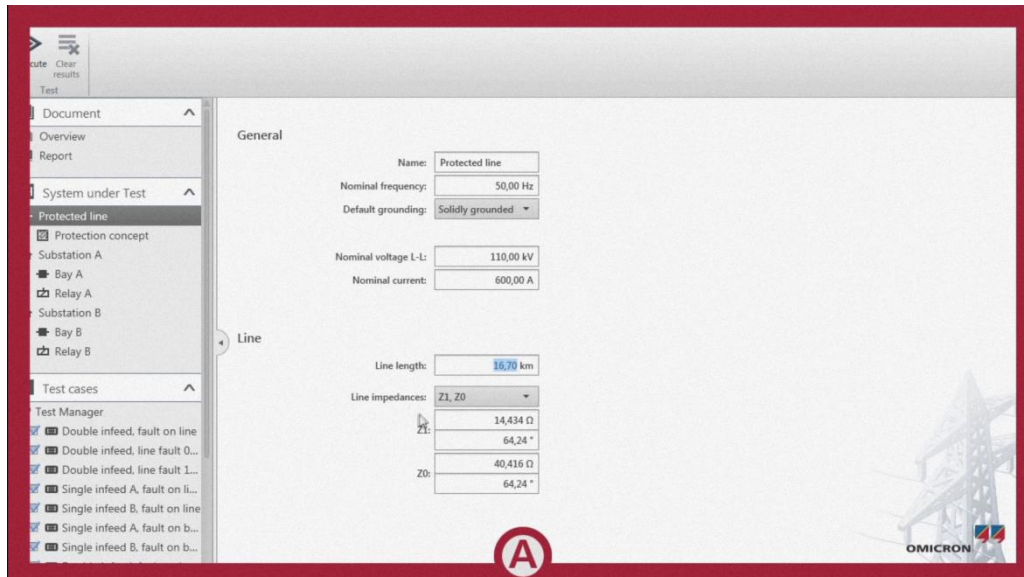


Рисунок 11 Ввод даних ЛЕП 110 кВ

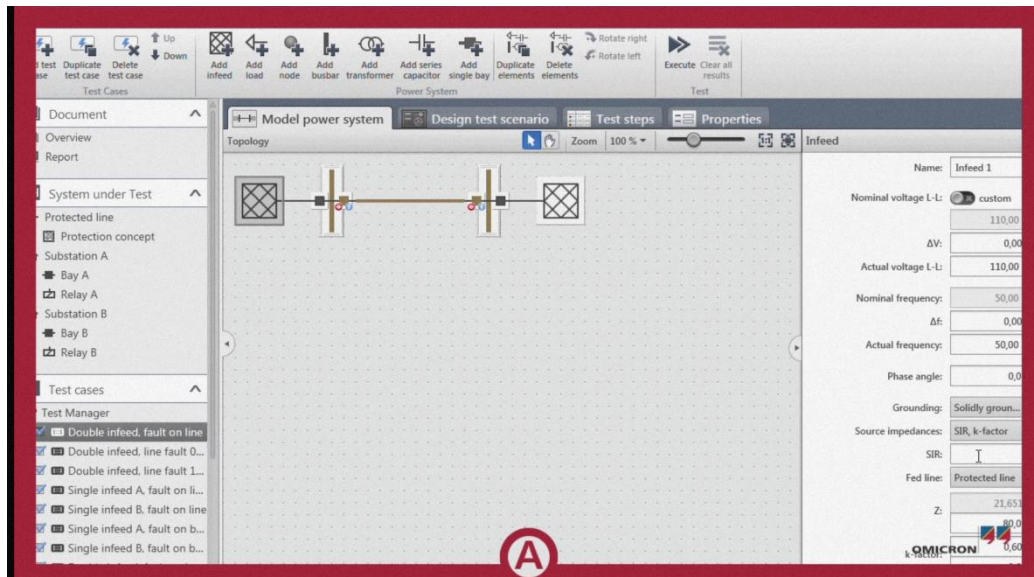


Рисунок 12. Застосування одного з шаблонів RelaySimTest для відображення фактичних параметрів лінії.

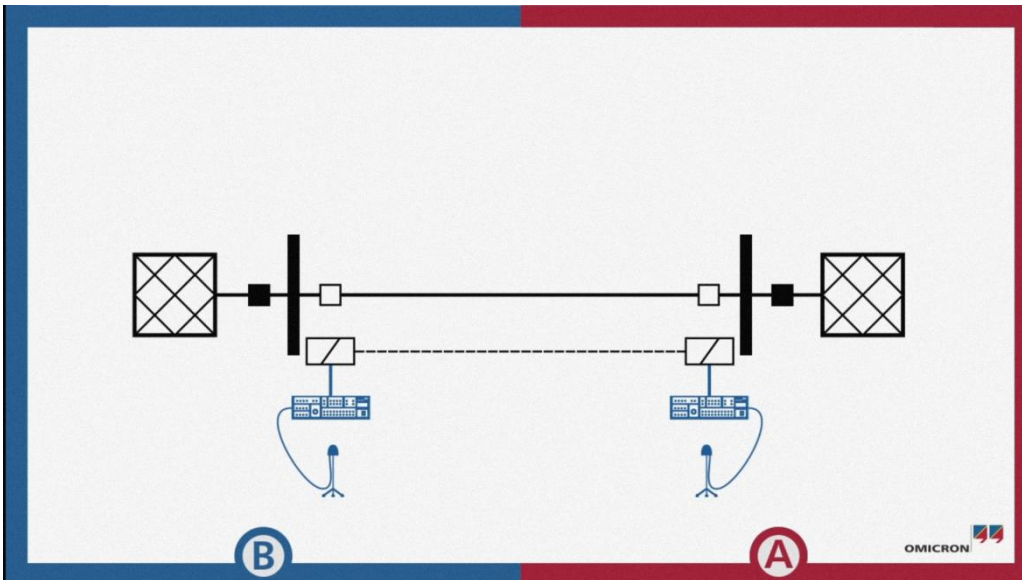


Рисунок 13. Синхронізація установок за допомогою CMGPS 588

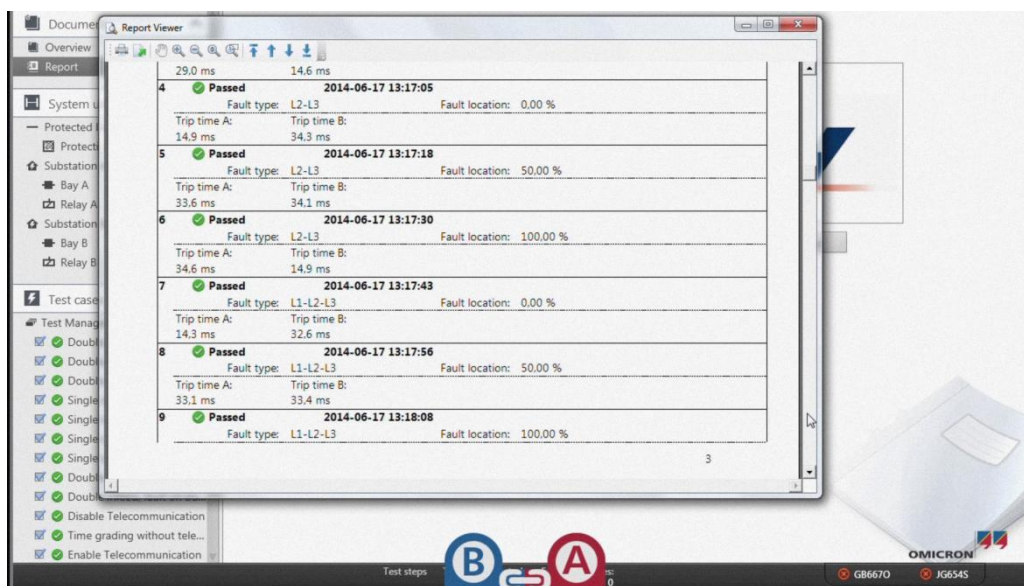


Рисунок 14. Звіт за результатами випробування.

Випробування пристроїв РЗ за допомогою установкою СМС 356 від ПК OMICRON реалізується в режимі розімкненого контуру.

### 2.1.6. Можливості тестування РЗ в режимі розімкнутого контуру

Тестування в режимі розімкнутого контуру є ефективним методом перевірки пристроїв захисту у разі, якщо не потрібно перевірка реакції енергосистеми на дії пристроїв РЗ. [26]

Тестування в режимі розімкнутого контуру (open-loop) – це фізичне відтворення за допомогою перевірконої установки (ПУ), до аналогових виходів якої підключені аналогові входи струму та/або напруги випробуваного пристрою РЗ, заздалегідь отриманих вхідних сигналів захисту (осцилограм аварійного процесу). Управління ПУ здійснюється за допомогою комп'ютера (ноутбука) із встановленим на ньому спеціалізованим програмним забезпеченням (ПЗ) виробника перевірконої установки. ПЗ відповідає за запуск або зупинення тестування, конфігурування ПУ, вибір програми тестування, перегляд, аналіз, а також вибір аварійних осцилограм для подальшого відтворення.

Таким чином, ПУ протягом часу відтворення аварійної осцилограми, відображає об'єкт, що захищається і перехідні процеси протікають у ньому в режимі реального часу.

## **2.2. Цифровий програмно-апаратний комплекс RTDS**

Також достойний випробувальний комплекс має цифровий програмно-апаратний комплекс RTDS (Real Time Digital Simulator) моделювання енергосистем у реальному часу. Він є зразком апаратного забезпечення в режимі замкненого контуру (closed-loop).

### **2.2.1. Характеристики комплексу RTDS**

Симулятор RTDS дозволяє об'єднати реальні пристрої з віртуальною моделлю середовища їх експлуатації та проводить комплексні випробування пристроїв РЗА з повноцінним зворотним зв'язком та реакцією на зміни їх стану. Також RTDS дозволяє проводити дослідження енергосистем у статичному та динамічному режимах, виконувати випробування релейного захисту. [6]

Загальна характеристика цих потужних цифрових пристроїв реального часу це його здатність до паралельної обробки для моделювання електромагнітних перехідних процесів у великих мережах, крім того, його конструкція дозволяє проводити широкий спектр випробувань електричного обладнання, таке як цифрові захисні реле та системи управління (швидка перевірка ефективності нових захисних засобів реле, перед їх введенням в

експлуатацію в електричні підстанції, для підвищення надійності енергосистеми) (Рис. 15).

Симулятор RTDS — це суперкомп'ютер із програмним забезпеченням дозволяє імітувати великі потужні мережі в реальному часі. Крім того, програмне забезпечення RTDS робить розрахунки для великої бібліотеки потужностей компонентів, системи керування та автоматизованого захисту та сумісний з інтерфейсом користувача, що робить складання та вивчення різноманітних електроприладів змінного, постійного струму системи легші та інтегровані.

### **2.2.2. Відповідність RTDS міжнародним стандартам.**

Він був створений у відповідності до стандарту IEC 61850 - багаточастинний стандарт призначений для забезпечення можливості взаємодії між усіма приладами в складі автоматизованих систем керування енергетичних підприємств. Отже цей багаточастинний стандарт визначає комунікаційні мережі та системи для автоматизації енергетичних підприємств і ґрунтовнішу комунікаційну архітектуру для таких підсистем як системи автоматизації підстанцій. Сукупність усіх підсистем може відображати опис комунікаційної архітектури для загального керування всією енергосистемою. В Україні діє національний стандарт ДСТУ IEC 61850-5:2019 (IEC 61850-5:2013, IDT) «Комунікаційні мережі та системи для автоматизації електроенергетичних підприємств. Частина 5. Технічні вимоги до функцій і моделей приладів».[7]

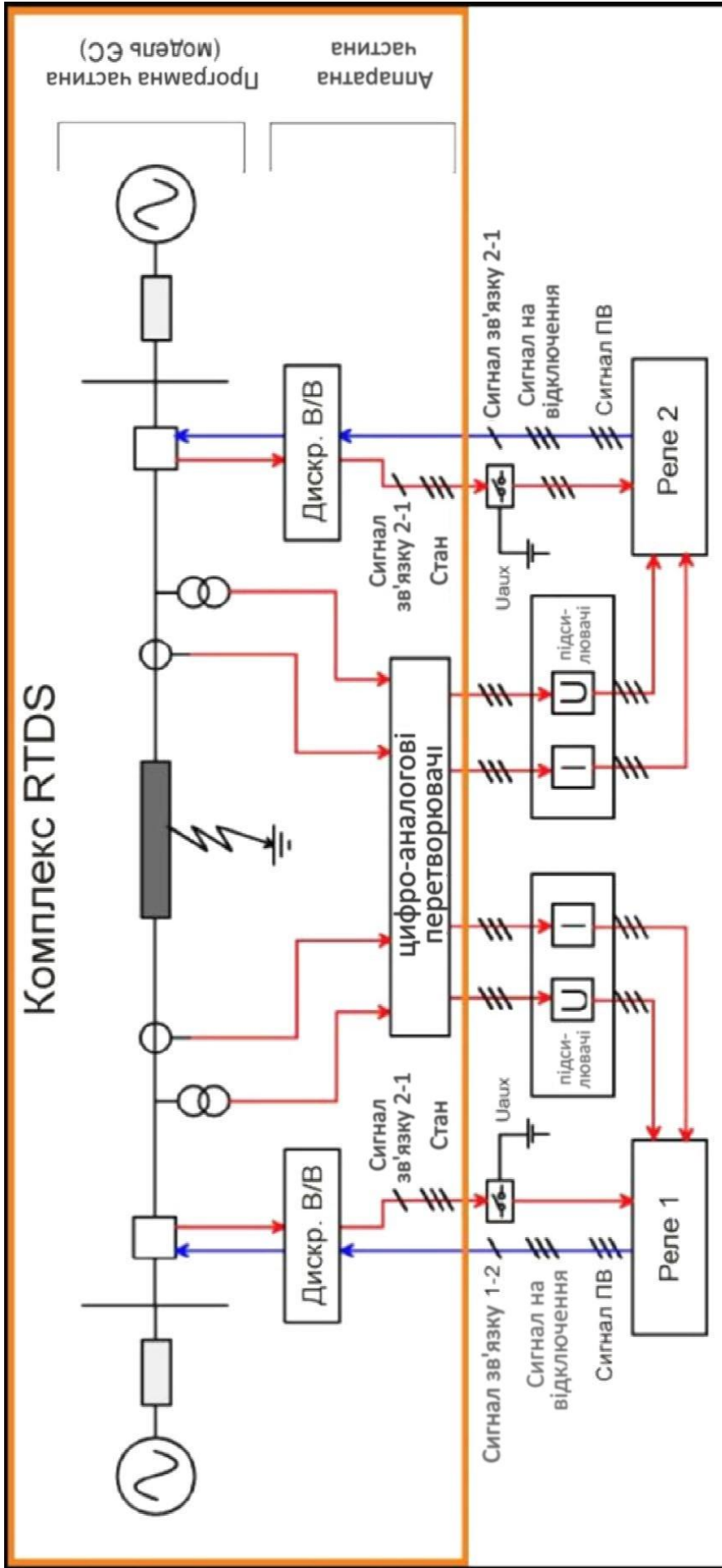


Рисунок 15. Структурна схема випробувань цифрового захисту за допомогою комплексу RTDS

### **2.2.3. Модульна конструкція симулятора RTDS**

Симулятор RTDS організовано в апаратних блоках, що називають стелажі. Вони в основному складаються з процесора і комунікаційних процесорних карт обробки. Кожна стійка може включати від 2 до 6 карт PB5 (використовується для вирішення задач, поставлених системою живлення та компонентами системи керування) і 1 карта зв'язку з робочою станцією (GTWIF, Гіга плата інтерфейсу робочої станції трансивера). Усі картки вмонтовано в стійки з'єднані із загальною пластиною, розташованою ззаду. Конструкція RTDS є модульна та дозволяє додавати стійки і карти аналогових і цифрових сигналів. Мінімальна продуктивність роботи стійки RTDS досягнуто з 2 картами PB5. Кожна стійка опрацьовує вузол з 1 або 2 електричних підстанцій до максимум 90 однофазних вузлів або 30 трифазних шин на підстанції.

### **2.2.4. Функції карти керування зв'язком між RTDS і ПК**

Основною функцією карти GTWIF є керування зв'язком між симулятором RTDS і ПК. Ця картка не бере активної участі в рішення системи живлення, але відіграє важливу роль як пристрій інтерфейсу та керування імітацією (завантаження, запуск і зупинка моделювання; генерація таймерів; координація передачі даних між процесорними картами при моделюванні; у випадках симуляції з кількома стійками він координує передачу даних і синхронізує часовий крок між різними стійками; всі зв'язки з в ПЗ RSCAD®)

### **2.2.5. Обробка часових кроків в RTDS за алгоритмом Доммеля.**

RSCAD - це графічний інтерфейс, який дозволяє користувачам створювати симуляції, виконувати та аналізувати випадки моделювання. В основу його роботи покладено алгоритм, розроблений Германом Доммелем, згідно з яким обчислення здійснюються дискретно з деяким часовим кроком).

[27]

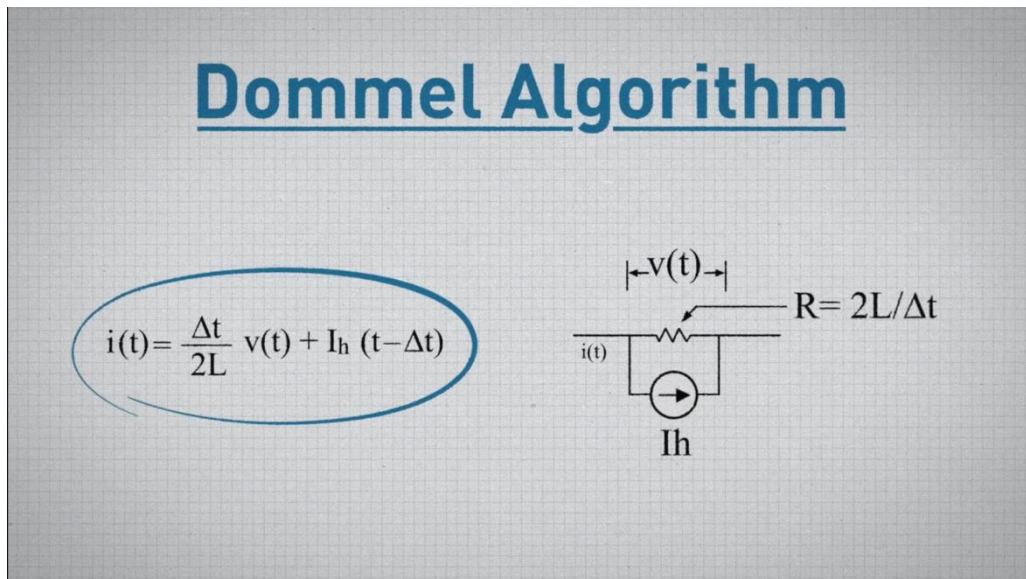


Рисунок 16. Алгоритм Доммеля методом інтегрування

Алгоритм Доммеля перетворює диференціальні рівняння на лінійні алгебраїчні за допомогою правил інтегрування. Це дозволяє всім елементам в даній мережі бути представленими еквівалентними джерелу струму та провідності (Рис.16). Протягом кожного часового кроку архітектура паралельної обробки RTDS використовує цей алгоритм для виконання процесу забезпечення системи живлення. По перше, визначена користувачем система живлення перетворюється на еквівалентну лише з джерелом струму та резисторами. Для цієї еквівалентної мережі формується матриця провідності. Потім карти процесора симулятора RTDS розраховують еквівалентну провідність і доданий струм кожного із компонентів мережі і надсилають їх до процесора «мережевого рішення», який відповідає за обчислення напруги для мережі. Далі ці дані про напругу передають назад до допоміжних процесорних карт, щоб вони могли обчислити свої струмові інжекції та значення провідності для наступного часового кроку. Цей процес повторюється на кожному етапі часового кроку.

Паралельна обробка, необхідна для виконання всіх цих обчислень, виконується на процесорних картах. Ці карти виконують необхідні обчислення паралельно та обмінюються даними через комунікаційні шини, до яких вони підключені. Спеціально розроблені карти вводу-виводу симулятора зв'язуються

з симулятором через волоконно-оптичний кабель і забезпечують оптично ізольований аналоговий або цифровий вхід-вихід для взаємодії із зовнішнім обладнанням. Ці карти можуть бути встановлені на DIN-рейці в задній частині kabіни RTDS або можуть бути в окремих лабораторіях із зовнішнім обладнанням користувача на великій відстані. Спеціалізоване обладнання для симулятора RTDS дозволяє користувачу спілкуватися із зовнішніми пристроями через різні протоколи Ethernet, синхронізувати часовий крок із зовнішнім джерелом часу (годинник GPS), моделювати модульні багаторівневі перетворювачі та їх елементи керування. Ліцензія включає всі програмні модулі та велику бібліотеку компонентів. [5]



Рисунок 17. Можливості цифрового симулятора реального часу (RTDS)

Електромагнітне моделювання перехідних процесів забезпечує миттєве вихідне значення, що змінюється в часі. Моделювання в ідеалі має форму хвилі, яка відповідає формі хвилі струму або напруги системи, якщо її вимірювати за допомогою осцилографа. Тож це дозволяє отримати більш глибокий аналіз в широкому діапазоні частот і здатність відтворювати швидкі перехідні процеси в енергосистемі. Чим вища частота дискредитації моделювання, тим результати з вищою частотою можна відтворити. Тому період частоти цієї дискредитації або

відстань між двома послідовними вихідними даних називається часовим кроком.

Моделювання проводиться з часовим кроком  $\Delta t$  рівним 25-50 мкс для режимів енергосистеми та 1-3 мкс для високочастотного перемикання силової електроніки (яке може бути в діапазоні частот від десятків до сотень кілогерц). Щоб працювати в режимі реального часу, комп'ютер повинен розв'язати всі рівняння для мережі в режимі реального часу, і цей час має бути меншим або дорівнювати часовому кроку моделювання  $\Delta t$  (Рис.18).

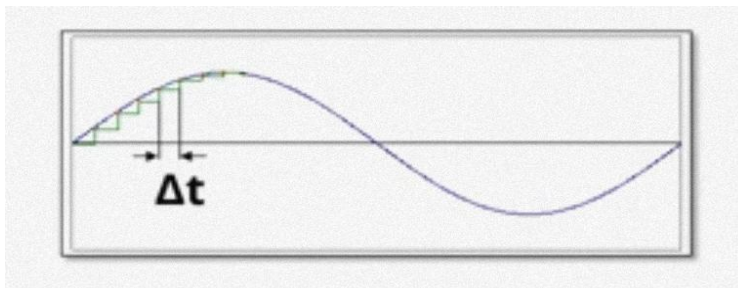


Рисунок 18. Алгоритм Доммеля зображений через моделювання струму або напруги у формі хвилі

### 2.2.6. Можливості модулів RSCAD

Програмне забезпечення розроблено виключно компанією RTDSTechnologies і не потребує сторонніх модулів.

Модуль Draft дозволяє користувачам побудувати симуляційний випадок, використовуючи різні моделі компонентів, доступні в бібліотеках RSCAD (Рис.19). Користувач може редагувати параметри компонентів, щоб визначити кожен елемент мережі. Після визначення мережі користувач компілює свою заявку, яка створює виконуваний код для запуску на обладнанні симулятора RTDS.

Далі модуль RunTime використовується для запуску, зупинки та взаємодії симуляції. Після запуску моделювання користувач може змінювати параметри за допомогою перемикачів, повзунків та кнопок, імітуючи замикання та інші випадки несправності обладнання. Ці події в роботі обладнання відображаються графічно, їх можна переглядати та експортувати. RunTime

також включає засоби автоматизації, за допомогою яких користувач може створити файл сценарію для виконання багатьох різних симуляцій.

RSCAD включає навіть засоби для визначення параметрів ліній електропередач та кабелів, а також інструменти для створення користувачами компонентів керування та системи живлення.

Основною перевагою виконання симуляцій у реальному часі є можливість підключити зовнішнє обладнання до моделювання та перевірити його в режимі замкнутого контуру. Це дає можливість не тільки спостереження за реакцією пристрою захисту або керування заданим сигналом, але також отримати інтерфейс відповіді пристрою назад у змодельовану мережу.

Наприклад, при дослідженні роботи релейного захисту разом з моделлю енергосистеми при спрацюванні, реальний захист впливатиме на віртуальний вимикач у моделі, що дає можливість вивчити поведінку енергосистеми після спрацювання РЗ (Рис.20) [18].



Рисунок 19. Бібліотека моделювання в RTDS

Можна задавати різні значення частоти, струмів, напруг, типи несправностей для моделювання в реальному часі.

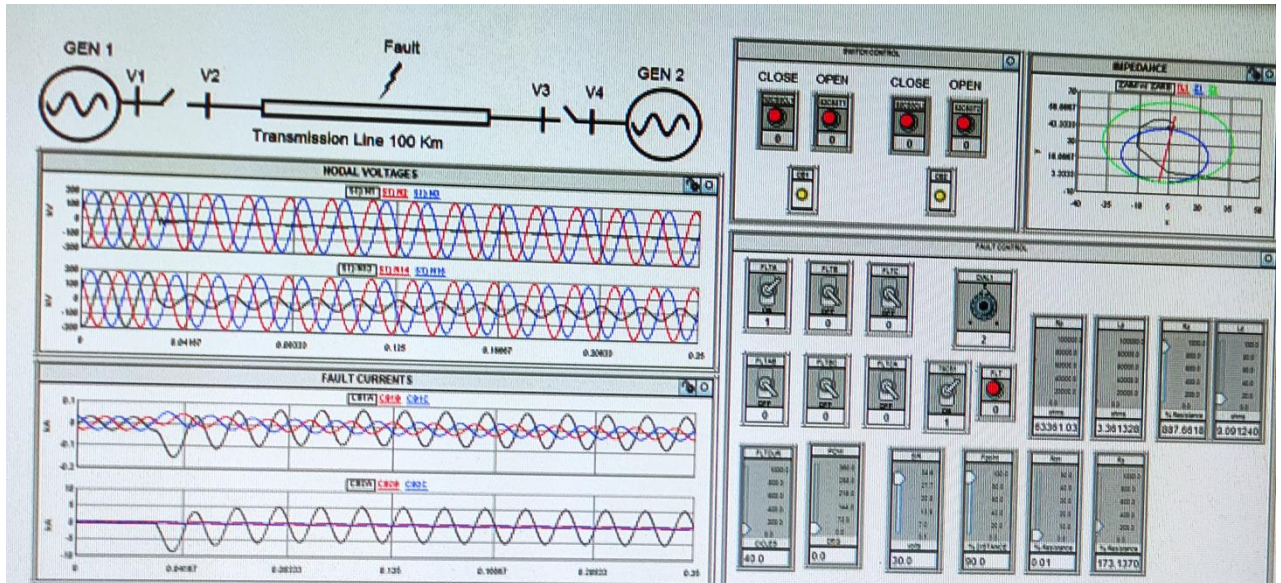


Рисунок 20. Моніторинг і керування енергосистемою в реальному часі в модулі RunTime з RTDS.

### 2.2.7. Застосування комплексів RTDS закордонними підприємствами.

Випробувальні (моделювальні) комплекси RTDS використовується практично всіма основними закордонними виробниками захисних реле для розробки та контрольних тестувань. Встановлені вони в комунальних підприємствах багатьох країн світу (SSE (Велика Британія), Manitoba Hydro (Канада), RTE (Франція), Furnas (Бразилія), CSG, SEPC (Китай) та ін.). Ці комплекси можуть використовуватись під час введення в експлуатацію обладнання; для дослідження запропонованих змін в мережах, контроль модифікації; навчати персонал теорії та експлуатації; прискорити графік виконання проекту та зменшити ризики при встановленні обладнання (запобігти неправильній роботі, негативній взаємодії) (Рис.17).

### **2.3. Реле Easergy P5 з вбудованим віртуальним інжектором.**

Важливий внесок у розвитку цифрових реле зробила компанія Schneider-electric. Продукт цієї компанії - реле захисту Easergy P5 для конструювання релейного захисту для електричних мереж середньої напруги (6-35кВ). [34]

#### **2.3.1. Характеристики пристрою захисту Easergy P5.**

В цьому пристрої окрім сучасних функцій захисту (функція вбудованого дугового захисту під час перемикання або під час неочікуваних умов (функція захисту визначає, чи існує спалах дуги, і вживає заходів (в мілісекундах), щоб ізолювати підключений автоматичний вимикач); сумісність зі звичайними трансформаторами струму/напруги або з малопотужними вимірювальними трансформаторами струму (до 24 кВ) (LPCT) та напруги (датчики напруги для внутрішнього застосування з ізоляцією до 36 кВ) (LPVT); вбудована кібербезпека, створена з урахуванням новітніх технологій, сертифікована відповідно до стандарту IEC 62443 SL1 (за замовчуванням Easergy P5 включає важливі функції, такі як керування паролями, захист портів і захищений зв'язок, що відповідає останнім міжнародним стандартам)) Easergy P5 підтримує такі цифрові інструменти:

- eSetup Easergy Pro - програмне забезпечення з можливістю проведення тестування за допомогою віртуального інжекційного симулювання контрольованих параметрів (струму, напруги);
- вбудований веб-сервер, що дозволяє легко та швидко змінювати налаштування;
- багатомовний людино-машинний інтерфейс (ЛМІ) для індивідуального обміну повідомленнями.

### 2.3.2 Функціональні можливості програмного забезпечення до Easergy P5

Easergy P5 надає кілька різних функцій програмування, що дозволяють користувачеві створювати функціональні можливості адаптовані під унікальні вимоги проекту. Принцип роботи полягає в тому, що пристрій отримує аналогові/дискретні/віртуальні сигнали, обробляє інформацію та посилає команди на аналогові/дискретні/віртуальні виходи.

У Easergy P5 передбачено кілька матриць, що дозволяють зв'язати апаратні та програмні елементи для формування ланцюжків сигналів захисту та управління (Рис.21). Ця функціональність може використовуватися для зв'язку різних входів, виходів, статусів та сигналів, що дозволяють активувати або блокувати інші елементи захисту, команди керування, функції автоматики чи записи. До 250 GOOSE-повідомлень (мережевих входів) можуть бути пов'язані з віртуальними входами і таким чином отримані для обробки [16].

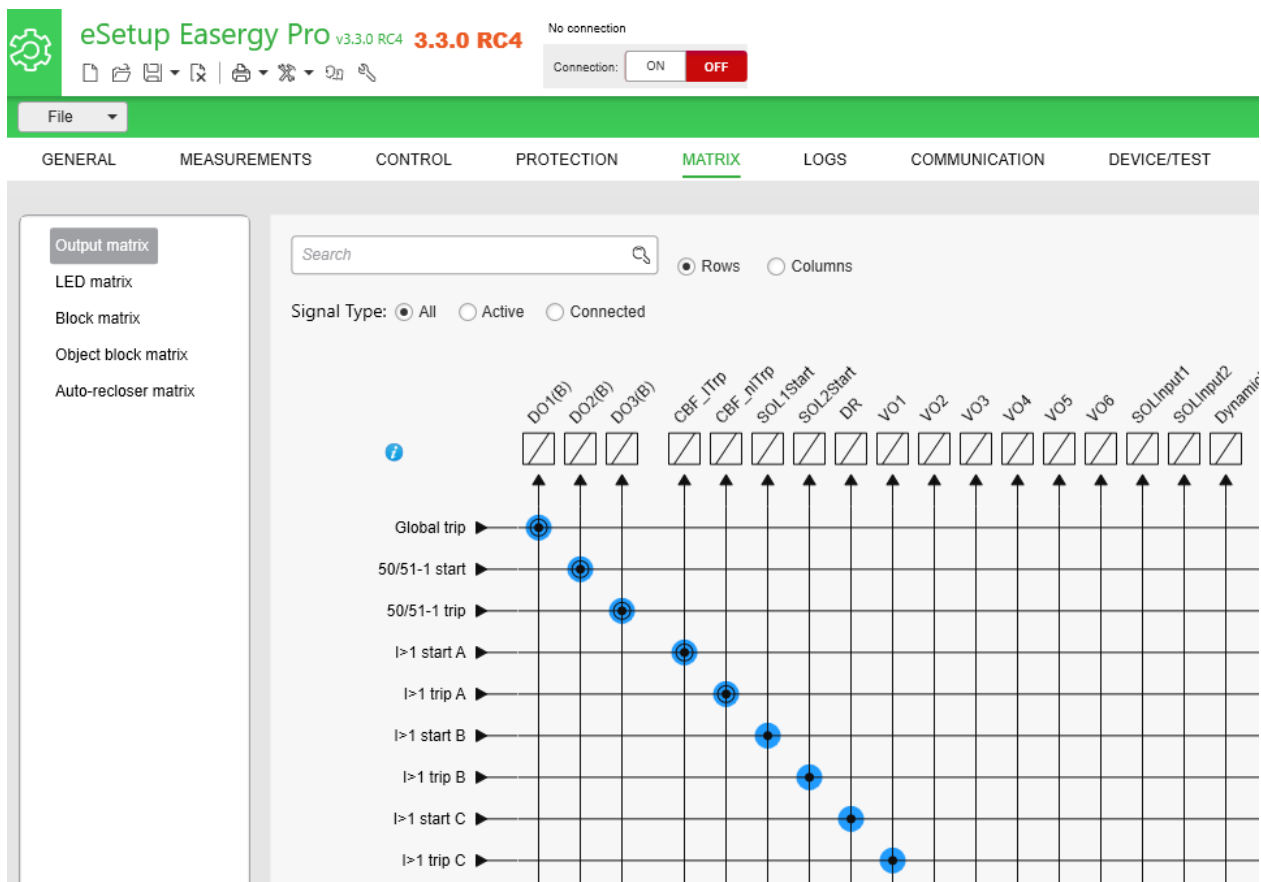


Рисунок 21. Матриця виходів у eSetup Easergy Pro

Easergy P5 підтримують програмовану користувачем логіку для булевих сигналів. Налаштовувана користувачем логіка може бути використана для створення функціональності, яка не передбачена за замовчуванням. 128 логічних вхідних модулів, 50 віртуальних входів, 20 віртуальних виходів і логічні таймери забезпечують гнучкий і простий використання інтерфейс, оптимізований для реалізації критичних за часом схем зі швидкістю виконання 10 мс.

На додаток до "Програмованої логіки" Easergy P5 можуть бути оснащені додатковою логікою на основі ISaGRAF™. За допомогою цієї додаткової функції пристрою користувач може визначити свою програмовану логіку, використовуючи середовище програмного інструменту ISaGRAF™ Workbench компанії Rockwell Automation. Додаткова логіка може використовуватися спільно з програмованою логікою для створення дуже гнучких та потужних логічних можливостей. Розширена логіка оптимізована для конфігурування дуже гнучких, але менш трудомістких прикладних функцій, наприклад, складних схем керування, таких як АВР.

### **2.3.3. Умови для проведення віртуального інжекційного тестування**

Easergy P5 має модульну конструкцію для опцій комунікаційного порту та резервної пам'яті, а також збільшена кількість входів і виходів для більших можливостей а також вбудоване віртуальне інжекційне тестування, яке відноситься до тестування в режимі розімкнутого контуру (open-loop).

Функція віртуального інжекційного тестування доступна лише в режимі онлайн, коли пристрій підключено до ПК за допомогою кабелю USB (Рис.22).



Рисунок 22. Комплектація пристроїв необхідна для віртуального інжекційного тестування

#### 2.3.4. Моделювання віртуального інжекційного тестування

Коли ПК підключений до Easergy P5, запускаємо програмне забезпечення eSetup Easergy Pro. Під час першого використання, потрібно розархівувати файл програмного забезпечення і запустити файл eSetup Easergy Pro.exe.

Після введення паролю та логіну можна праворуч на екрані Easergy Pro з'являється вікно віртуальної інжекції.

Після підключення до реле та входу в систему за допомогою Easergy Pro користувачеві потрібно змінити режим пристрою на «Тест» або «Тест заблоковано». В режимі «Тест» реле буде спрацьовувати нормально. А якщо увімкнено режим «Тест заблоковано», то спрацювання контактів реле не відбувається. [37]

Кількість циклів для віртуального інжекційного тестування може дорівнювати навіть 200 циклам та більше.

Задаються значення вимірювань (струму напруги), щоб підготувати моделювання; визначають значення найбільших та найменших значень заданих параметрів.

Візуалізацію поточних значень можна побачити на графіках, та спостерігати їх зміну при нових значеннях струмів, напруг і частоти. Щоб зупинити виконання віртуального тесту достатньо натиснути функцію Stop.

Easergy P5 дає можливість використовувати файли COMTRADE для віртуального інжекційного тестування. Для цього достатньо зберегти файл, записаний у форматі COMTRADE, а за потреби відкривати їх та задавати необхідні параметри струмів на напруг для ліній. Натискаємо «Пуск», щоб виконати віртуальне інжекційне тестування, визначене файлом Comtrade. [24]

Також можна обрати спосіб введення:

- одноразове введення;
- циклічний режим;
- нульова послідовність.

Процес показує на скільки відсотків оброблено віртуальну інжекцію та нові значення параметрів [17].

При застосуванні віртуального інжекційного тестування дуже важливо переконатися, що процес відбувається у колах вторинної комутації.

Провідні функції захисту Easergy P5 доповнюються комплексним набором інструментів доступні на мобільних пристроях, таких як смартфони чи планшети, настільні комп'ютери. Це означає, що ви отримуєте простіше встановлення, налаштування та обслуговування, що дозволяє заощадити час і гроші. Дистанційний контроль і моніторинг дозволяє користувачам повноцінно керувати пристроєм через бездротовий зв'язок із безпечнішої відстані.

### **2.3.5. Варіанти зв'язку для підключення та налаштування реле Easergy P5 за допомогою програмного забезпечення.**

Швидкість та зручність налаштування, контролю та експлуатації пристроїв Easergy P5 за допомогою веб-ЛІМІ. Веб-ЛІМІ, доступний через Інтернет за IP-адресою пристрою, не вимагає встановлення спеціального програмного забезпечення на комп'ютері. Ви можете безпосередньо підключатися до пристрою через веб-браузер. Потрібно лише увімкнути службу

веб-сервера при початковому налаштуванні Easergy P5 за допомогою eSetup Easergy Pro.

Веб-ЛІМІ використовує той самий дизайн сторінки, що й eSetup Easergy Pro.

Існують такі варіанти підключенні зв'язку:

*Підключення до SCADA через послідовний канал*

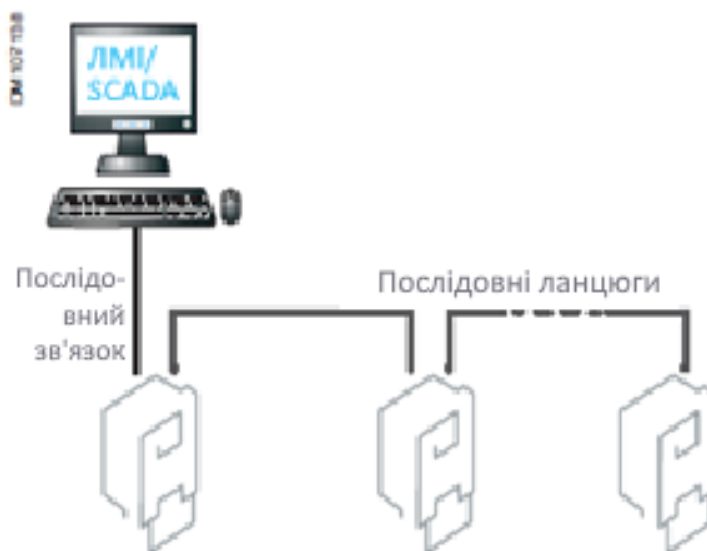


Рисунок 23. Підключення до SCADA через послідовний канал

Ця архітектура дозволяє підключати ЛМІ/SCADA до пристроїв релейного захисту Easergy за допомогою багатоканальної послідовної зв'язку (Рис.23).

## Підключення до SCADA через Ethernet

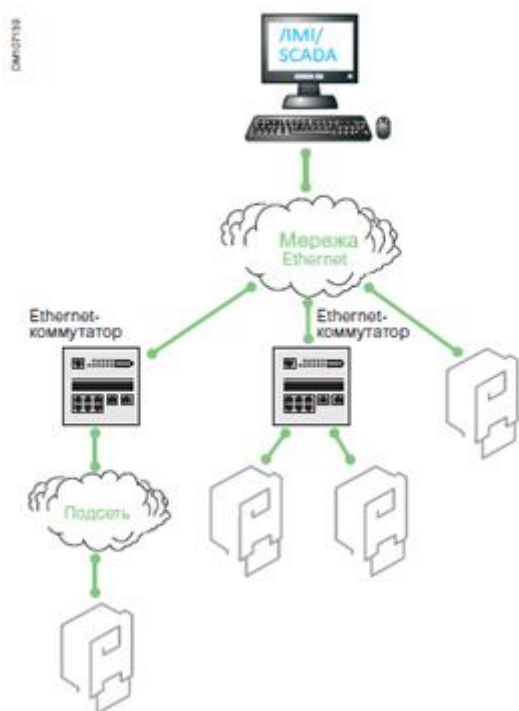


Рисунок 24. Підключення до SCADA через Ethernet

Ця архітектура дозволяє підключати пристрої релейного захисту Easergy безпосередньо до мережі Ethernet завдяки протоколам IEC 60870-5-103, IEC 60870-5-101, Ethernet/IP та DNP3 (послідовний/TCP), Modbus TCP/IP.

В одній мережі Ethernet можна використовувати протокол IEC 61850 з будь-яким з інших доступних протоколів (Рис. 29). Це дозволяє обмінюватися GOOSE-повідомлення між пристроями на польовому рівні, одночасно використовуючи інший протокол для інтеграції до SCADA. Також можливо підключити пристрій Easergy до двох різних систем керування, використовуючи один і той же порт зв'язку Ethernet та протокол IEC 61850 для однієї з них та будь-який доступний протокол для іншої системи.

Пристрій Easergy P5, оснащений двома Ethernet-модулями зв'язку, може обробляти 3 протоколи Ethernet одночасно, використовуючи або один IP-адрес, або три різні IP-адреси. За опціями, Easergy P5 має можливість подвійного резервування, використовуючи протокол PRP/HSR, для однієї системи та

окремо протокол резервування RSTP для іншої системи або інженерного каналу (Рис. 24).

### *Локальна внутрішня мережа*

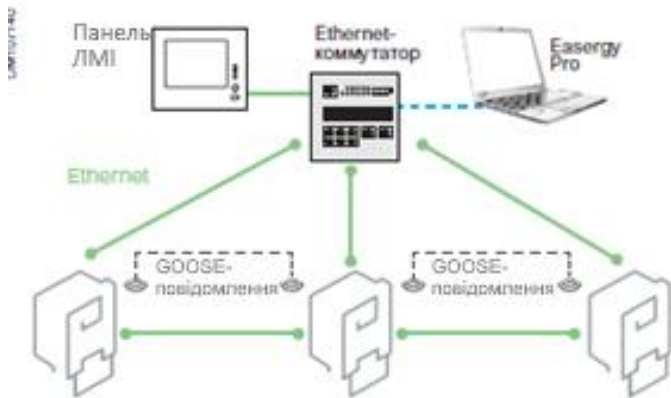


Рисунок 25. Підключення за допомогою локальної внутрішньої мережі

Ця архітектура забезпечує швидкий зв'язок за допомогою GOOSE-повідомлень між пристроями релейного захисту Easergy розподільчого пристрою, що дозволяє заощадити на кабельній продукції. Стандартно може застосовуватися для логічної селективності, ПРВВ (пристрій резервування відмови вимикача), скидання навантаження тощо [28]. Крім того, для контролю та керування розподільчим пристроєм можна використовувати панель управління ЛМІ через веб-браузер. Для підключення Easergy Pro необхідно передбачити додаткове з'єднання на панелі Ethernet-комутатора. У моделях Easergy P5 доступні 2 незалежні модулі зв'язку Ethernet. Це дозволяє впровадити локальну внутрішню мережу та зв'язок із SCADA по двох окремим мереж Ethernet (Рис.25).

### 2.3.6. Протоколи резервування для підключення та налаштування реле Easergy P5 за допомогою програмного забезпечення.

*Протокол RSTP (RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol))*

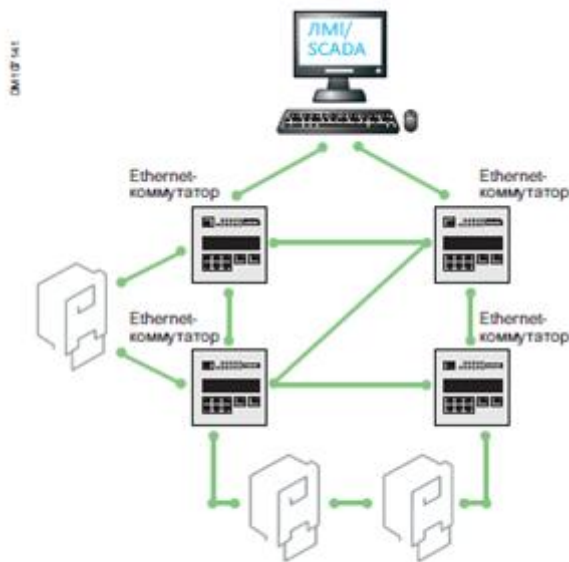


Рисунок 26. Зв'язок за протоколом RSTP

Принцип RSTP полягає в тому, щоб фактично відключити всі канали, які не потрібні в даний момент часу, перетворюючи топологію мережі в топологію дерева (Рис. 26).

Основною перевагою RSTP є його широке поширення і можливість роботи в мережі будь-якої топології. З іншої сторони протоколу RSTP вимагає кілька мілісекунд або навіть секунд для відновлення налаштування в разі переривання мережі.

С Easergy P5 стандартний час реконфігурації для кільцевої структури з 10 пристроїв становить 0,050 с. [29]

### Протокол PRP (*Parallel Redundancy Protocol*)

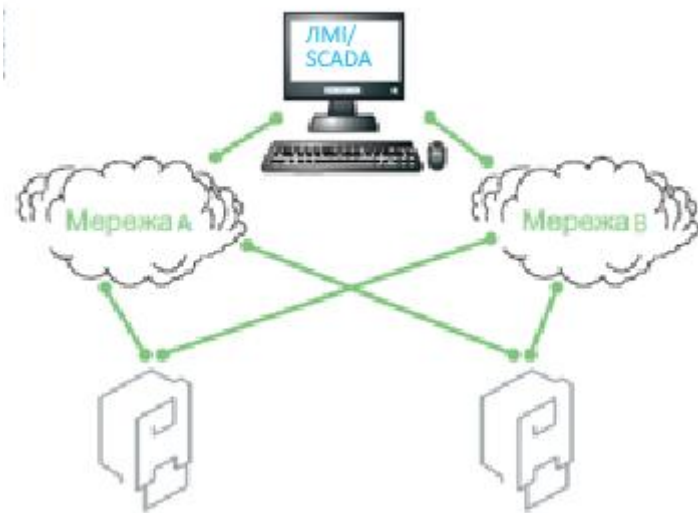


Рисунок 27. Зв'язок за протоколом PRP

Принцип протоколу PRP (паралельного резервування) полягає в синхронній передачі кадрів через дві незалежні мережі: А і В.

Приймаючий пристрій відповідає за видалення надлишкового кадру, якщо він був отриманий (Рис. 27).

Протокол PRP забезпечує «безшовне» резервування з відсутністю навіть невеликого часу перемикання з основного на резервний канал зв'язку, оскільки повторна передача кадру не потрібна. [30]

### HSR (*High-availability Seamless Redundancy*)

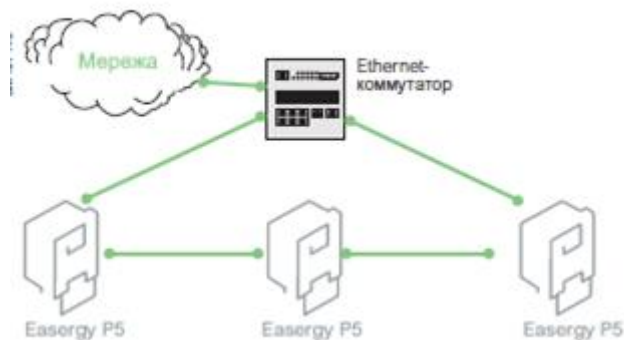


Рисунок 28. Зв'язок за протоколом HSR

HSR (безшовне резервування високої доступності) аналогічний PRP, але він працює тільки в кільцевій архітектурі (Рис. 28).

Кадри передаються по кільцю в обох напрямках, приймальний пристрій видаляє надлишкові кадри.

Протокол HSR також забезпечує «безшовне» резервування і є альтернативою протоколу PRP, коли мережева топологія обмежується кільцевою структурою.[8]

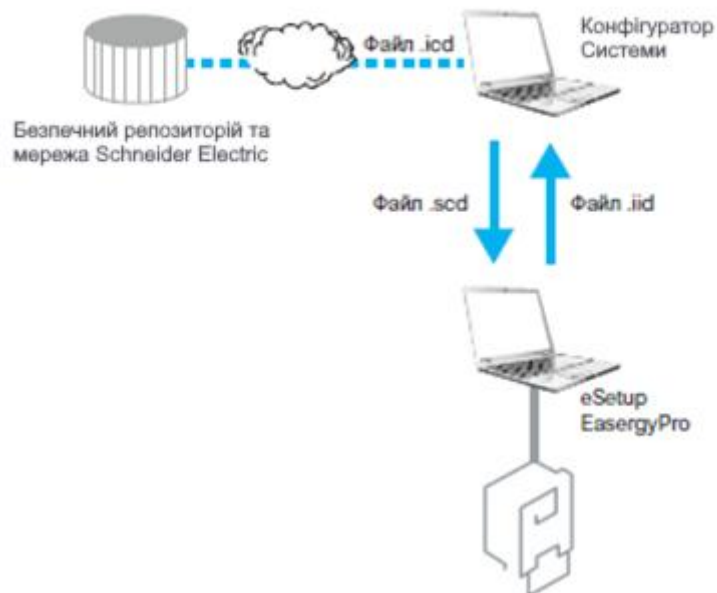


Рисунок 29. Обмін даними за протоколом IEC 61850

## РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЗАХИСТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІРТУАЛЬНОГО ІНЖЕКЦІЙНОГО ТЕСТУВАННЯ

### 3.1 Концепція цифрових двійників

На підстанціях зростає тенденція переходу від аналогових сигналів до цифрових даних згідно протоколу IEC 61850, де прописані вимоги до цифрових підстанцій, інтелектуальних мереж. Розвиток цифрових технологій призвели до нових досягнень та можливостей, а саме створення цифрових двійників реле.

Цифрові двійники - концепція, яка вже давно існує в закордонному промисловому секторі. У сфері релейного захисту і тестування реле – це функціональна копія, яка включає інтерфейси, функції та алгоритми. [31] Тобто сучасні інженери-проектувальники підстанцій можуть перевірити фізичний дизайн та компонування підстанцій за допомогою розробки компанії Siemens, а саме Digital Twins і оцінити продуктивність активів підстанцій окремо та як системи. Розробка є корисною, щоб уникнути помилок або виправляти їх на стадії розробки проекту, а не введенні в експлуатацію; також допомагає зменшити час виконання проектів. Крім того, оскільки всі тестування підготовлені заздалегідь і підтверджені віртуально, тому можливі несправності, спричинені помилками в конфігурації тесту (наприклад, логіка IED, налаштування функцій захисту), видаляються до того як вони з'являються в реальності. Усі ці фактори призводять до економії часу та більш точної попередньої оцінки того, коли підстанція запрацює та почне приносити дохід.

#### 3.1.1 Застосування цифрових двійників

Релейний захист Digital Twin можна використовувати для проведення всіх тестів, необхідних для перевірки програми захисту та керування, без апаратного забезпечення, без перебування в певному місці та без часу очікування між різними етапами проекту [32]. Прикладами того, що можна перевірити, є додатки з одним або декількома пристроями, включаючи функції захисту, блокування та зв'язок між цими пристроями. Перевірка не обмежується функціями релейного захисту для локальних вимикачів або інших пристроїв захисту (зазвичай відомих як горизонтальний зв'язок). Також можна

перевірити інтеграцію з системою автоматизації підстанції (відомою як вертикальний зв'язок) і кібербезпеку підстанції. Для цієї мети Siemens представила хмарну службу, яка містить SIPROTEC Digital Twin, їхні цифрові копії пристроїв SIPROTEC 5.

Виконання віртуальних тестів передбачає не тільки поведінку реле, але й моделювання процесу для надання тестових вхідних даних. Ці дані включають в себе віртуальну інжекцію струмів та напруг, віртуальну активацію двійкових входів IED і перетворювачі для сигналів від 0 до 20 мА. Моделювання процесу може надавати статичні вхідні дані або динамічні вхідні дані, записані у форматі COMTRADE [35]. Якщо ці тести генеруються програмним забезпеченням тестування реле, то тестування для введення в експлуатацію можна підготувати та оцінити до початку фактичного введення в експлуатацію.

Виходи з IED цифрового двійника реле відповідають реальним виходам IED. Вони включають в себе стан двійкових виходів; повідомлення надіслані за протоколами зв'язку; дані записані в реєстраторі подій/порушень; функціональні можливості НМІ з вимірюваннями; індикації для зручності користування. Завдяки цим засобам більшість тестувань можна підготувати без додаткового тестового набору для інжекції та в безпроводному вигляді. Перевага полягає в тому, що більшість проблем конфігурацій, які потребують виїзду на місце, з цифровими копіями пристроїв SIPROTEC 5 усуваються [34].

### **3.1.2 Цифрові двійники мережі**

Компанія Siemens, завдяки своїм розробкам, пропонує створення електричного цифрового двійника електромережі - найвище інженерне досягнення сучасності. За цим стоїть величезний потік цифрових даних, що дозволяє підприємствам планувати, експлуатувати та підтримувати свої мережі за допомогою цифрової моделі фізичного світу. З такими тенденціями, як децентралізація та відновлювані джерела енергії, цими даними стає дедалі складніше керувати й обмінюватися. Навіть найменші помилки в даних можуть

призвести до великих наслідків. Підприємства мають змогу об'єднати свої цифрові дані в електричні цифрові двійники електромереж.

Системи між різними підприємствами можуть обмінюються даними так як фізична електромережа єдина, але звичайне підприємство може підтримувати багато різноманітних моделей мереж, кожна з яких пов'язана з іншою корпоративним доменом. Кожна система працює розділено – із власним форматом даних, деталями та командою експертів, які вручну обслуговують ці дані.

Як правило, на електричних підприємствах дані знаходяться в центрі електромережі. Ними обмінюється велика кількість різних систем програмного забезпечення, що дозволяє підприємствам належним чином планувати, експлуатувати та підтримувати свою мережу.

Та утиліти витрачають багато часу та ресурсів на обробку вручну, оновлення та обмін інформацією між різними системами. Невідповідності під час обміну даними та навіть відсутність обміну даними можуть призвести до драматичних наслідків, таких як надмірні витрати, повторна робота, неоптимальна продуктивність системи та навіть відключення системи. Галузеві тенденції (такі як розподілена енергетика, відновлювані джерела енергії та цифровізація) лише збільшують кількість точок даних, які необхідно враховувати для досягнення оптимальної продуктивності системи.

У новому цифровому світі точність даних, складність моделі та автоматизація є основою для підтримки операційної досконалості та підвищення майбутніх інвестицій. Тому Siemens розробив Electrical Digital Twin, що дає можливість підприємствам можуть використовувати силу прозорості з єдиним джерелом правдивих даних для всього свого ІТ-ландшафту підприємств. Існує загальна мережева модель для полегшення моделювання електромережі в усіх сферах, необхідних для надійного, ефективного та безпечного планування, експлуатації та обслуговування електричних систем. Прибравши резервуар накопичення даних, Electrical Digital Twin дозволяє утилітам спростити процес обслуговування та обміну даними. Дані

синхронізуються з різних систем, а потім стандартизуються в одну багатокористувацьку базу даних за допомогою адаптерів або інтерфейсів на основі стандартів (Рис. 30).

Основними рисами цифрового двійника електромережі являються:

- точне єдине джерело правдивих даних;
- автоматизована синхронізація даних і моделей між кількома доменами, обмін даними між внутрішніми і зовнішніми системами;
- охоплює передачу та розподіл для комплексного аналізу;
- масштабоване обслуговування та обмін даними в IT-ландшафті;
- не залежить від постачальника та базується на стандартах.

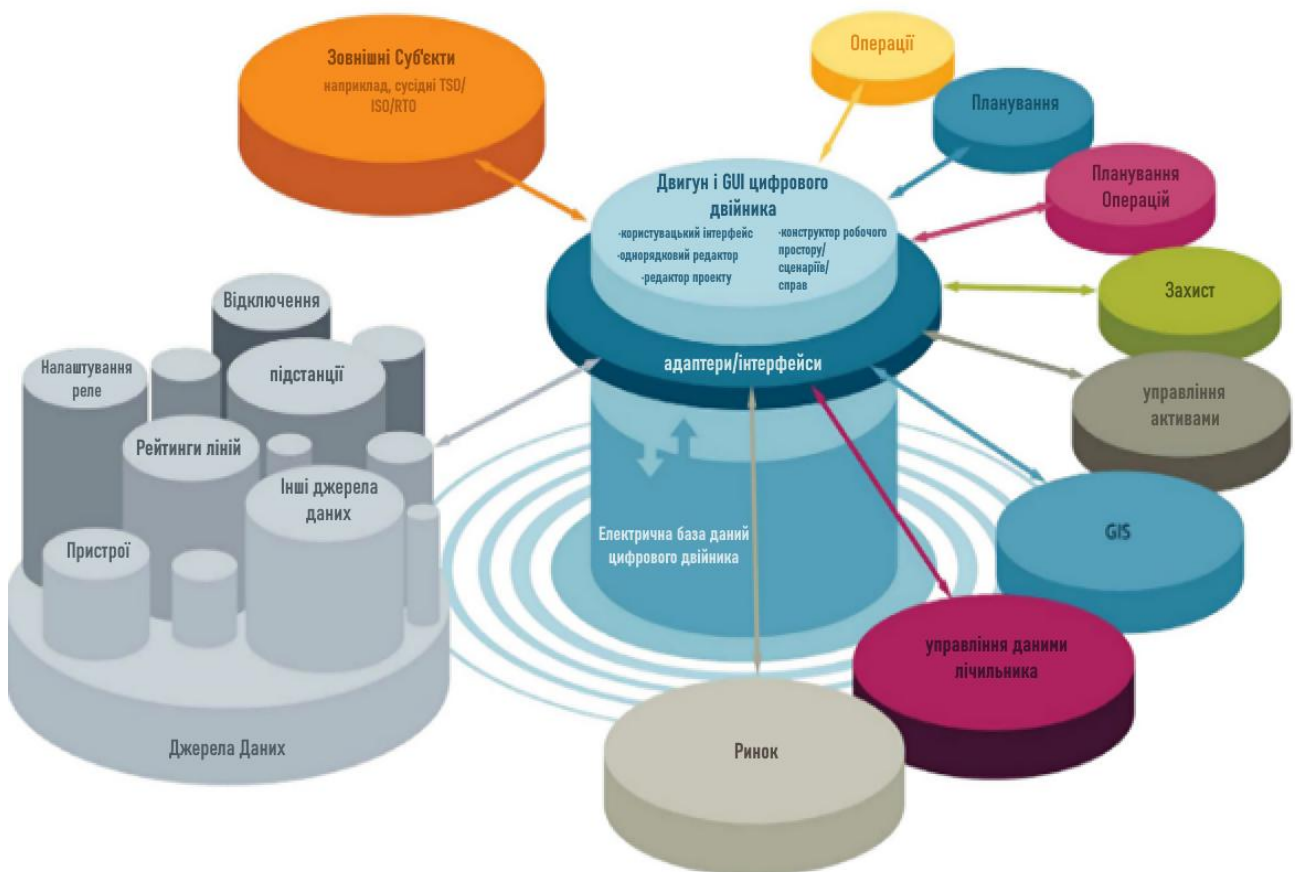


Рисунок 30. Мережева модель цифрового двійника електромережі (Electrical Digital Twin)

Експлуатація цифрового двійника електромережі має такі переваги :

*Підвищення ефективності та оптимізація процесів*

- усуває дублюючі процеси (завдяки одночасному використанню моделі ядра системи);
- сприяє автоматизації, що дає можливість заощадити 90% зусиль для створення розподільчої моделі;
- уніфікує процес моделювання та управління даними в різних функціях.

#### *Підвищення точності та узгодженості мережесевих моделей*

- зменшує ймовірність серйозних помилок при експлуатації та/або плануванні;
- відстежує зміни моделі з можливістю відтворювати випадки після змін;
- має інтерфейс із ключовими джерелами даних і функціями.

#### *Інтеграція аналізу моделювання передачі та розподілу*

- максимально збільшує потенціал інтеграції відновлюваної енергії;
- допомагає вирівняти пікові та змінні споживання електроенергії;
- підтримує вигідний баланс реактивної та активної потужності (для усунення коливань від відновлюваних джерел).

*Являється основою для розширення переваг і сценаріїв цифровізації в майбутньому:*

- повне використання мережі за рахунок максимального наближення до її фізичних можливостей;
- налаштування всіх можливих реле;
- ефективне управління активами;
- можливість тестування мережі в реальному часі. [9]

Цифровий двійник електромережі надає рішення для легкого, автоматизованого, повторюваного та точного створення прогнозів відповідно до запланованих перемикачів та інших керувань системою.

### 3.1.3. Файли COMTRADE, їх можливості.

Ключовою концепцією тестування віртуального реле є тестування в режимі розімкнутого контуру (open-loop). Під час віртуального випробування замість застосування реальних напруг, струмів і двійкових контактних сигналів вони подаються в цифровому вигляді на аналогові входи віртуального реле (для тестування сигналів прийому несучої схеми телезахисту або сигналів початку відмови вимикача). Цифрові значення цих сигналів зберігаються у файлі COMTRADE.

Є кілька причин для вибору стандарту COMTRADE:

перша – це формат, який протягом багатьох десятиліть використовується більшістю інструментів енергетичних систем, таких як RTDS, CAPE, ETAPЕ;

друга – IEC 61850 стандартизував COMTRADE як формат файлу для реєстраторів збоїв;

третья - COMTRADE є стандартом із подвійним логотипом , який підтримується стандартами IEC та IEEE.

Для того щоб файл COMTRADE використовувався у віртуальному тестуванні, має бути можливість отримати дані з файлу та обробити їх так, ніби це було в реальному часі, але відбувається у віртуальному часі , пов'язаному з віртуальним реле. Це означає, що тести можуть бути швидшими або повільнішими, ніж у реальному часі, але файловий процесор повинен взаємодіяти з віртуальним ретранслятором , щоб час відповіді відповідав реальному ретранслятору. Коли файл обробляється, відповідь реле аналізується за допомогою реєстратора подій реле, реєстратора збоїв або просто моніторингу віртуального реле НМІ, залежно від складності тестування. При тестуванні в режимі розімкнутого контуру немає взаємодії між віртуальним реле та віртуальним тестовим набором. Тим не менш, є багато аспектів продуктивності та роботи реле, які можна оцінити та перевірити [5].

Пакет Megger RTMS (Програмне забезпечення для керування тестуванням реле) – це програмне забезпечення для реле, розроблене для використання з автоматизованими приладами для тестування реле Megger серії SMRT і FREJA. Ці тестові набори можуть генерувати COMTRADE на основі тестових послідовностей, необхідних для виконання віртуальних тестів. SMRT підключається до віртуального тестового пристрою замість реального тестового приладу і, таким чином, користувач може створювати необхідні тестування, а потім створювати еквівалентні тестові файли COMTRADE. Конфігурація віртуального тестера відображає реальні тестові набори SMRT і FREJA, тому він стає цифровим двійником випробувального обладнання для інженера з налагоджування.

Якщо для програми потрібно більше струмів і напруг, ніж доступно для одного тестового набору, у файлі налаштувань COMTRADE є можливість дозволити це. Навіть незважаючи на те, що в такому випадку це не буде відповідати одній частині тестового обладнання, це розташування може бути відтворено в реальному пусконалагоджувальному тестуванні з двома і більше тестовими наборами, з'єднаними послідовно, щоб отримати необхідну кількість входів і виходів. [35]

Файли COMTRADE для цілей тестування можна створити іншими способами. Тим не менш, перевага їх створення за допомогою програмного забезпечення RTMS полягає в тому, що підготовлені тестові приклади готові до використання під час реального введення в експлуатацію. І вони не тільки підготовлені, але й перевірені та налаштовані, оскільки доведено що віртуальні випробування дають задовільні результати. Після того, як користувач отримує досвід віртуального тестування Digital Twin, кількість тестів, які будуть повторюватися під час реального введення в експлуатацію, значно скоротиться.

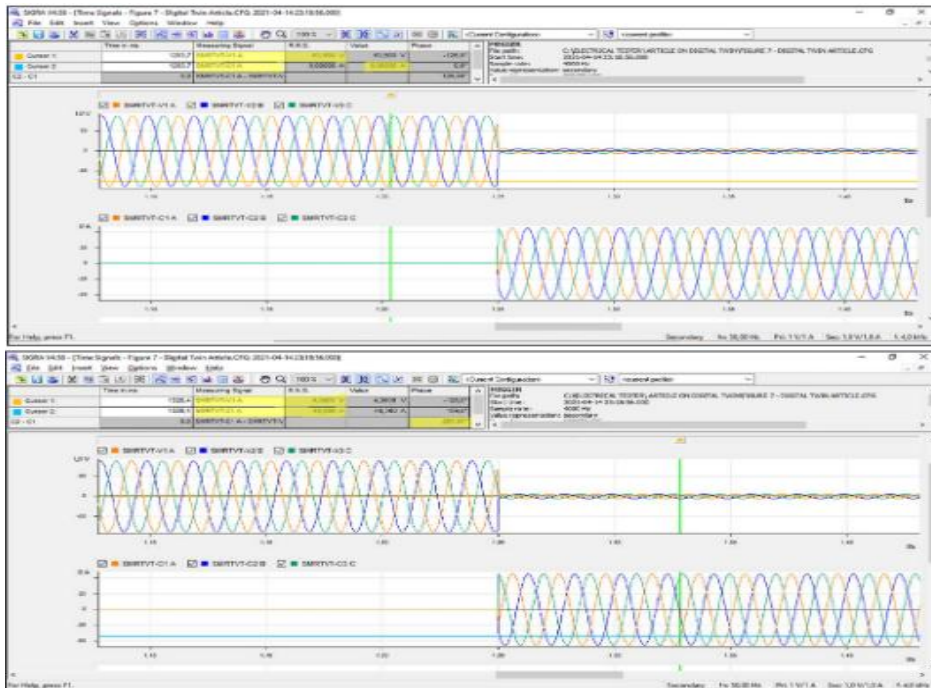


Рисунок 31. Відкриття файлу COMTRADE за допомогою інструменту Siemens DIGSI/SIGRA

### 3.1.4 Кроки тестувань.

Кроки, необхідні для підготовки до віртуального тестування, не дуже відрізняються від тестування в реальному світі. Основна відмінність полягає в тому, що все робиться програмно, що значно прискорює і спрощує речі, які можуть бути трудомісткими та складними в реальному світі. Для того, щоб, наприклад, перепідключити або завантажити налаштування у різних місцях тепер потрібно лише кілька клацань мишкою.

Процес віртуального тестування реле включає такі процеси:

- створити віртуальну підстанцію, включаючи підключення, що відображає всю або частину реальної підстанції;
- розрахувати та завантажити налаштування у віртуальні пристрої релейного захисту IED;
- налаштувати всі тести, які потрібно виконати (різні функції або схеми захисту);

- віртуально підключити тестові пристрої до реле;
- виконати тести шляхом імпорту COMTRADE і відтворення на віртуальному пристрої;
- проаналізувати тести через реєстратор подій/порушень в реле, або просто за допомогою моніторингу віртуального реле НМІ.

### **3.1.5. Що можна перевірити в режимі розімкнутого контуру.**

#### *Вимірювання часу спрацювання реле (час спрацювання)*

Проста послідовність перед несправністю та несправність всередині робочої характеристики, призводить до команди відключення, записаної реєстратором збоїв захисного пристрою. За допомогою реєстратора збоїв можна виміряти внутрішню різницю в часі від моменту початку несправності до моменту, коли був поданий сигнал спрацювання (відключення). Час реакції вихідного контакту і час, необхідний платі аналогового та аналого-цифрового перетворення для обробки даних не моделюються в Digital Twin. Тому додавання 3 мс до внутрішнього часу для першого та приблизно 5 мс для останнього дасть гарне уявлення про час спрацювання реле, який буде вимірюватися на підстанції. Типовий час реакції релейного бінарного виходу контакту може варіюватися від 3 мс до 10 мс, залежно від використовуваної карти двійкового виводу. Якщо використовуються статичні виходи, час може бути менше 1 мс.

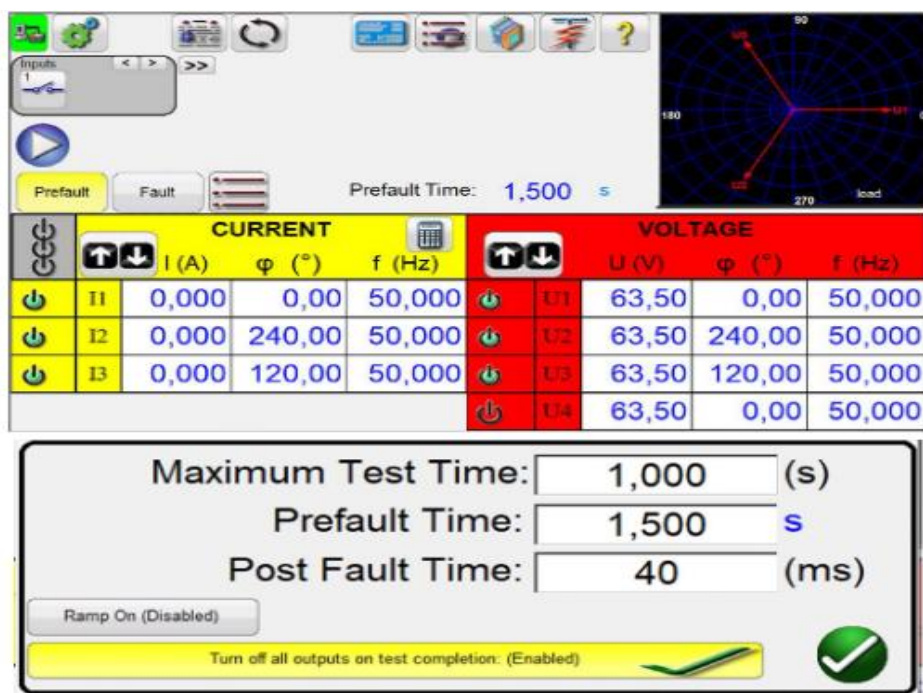


Рисунок 32. Налаштування тестів для вимірювання часу спрацювання віртуального реле

Необхідне відображення сигналів тестового набору (аналогових сигналів COMTRADE) до віртуальних аналогових входів реле також здійснюється в хмарі.

Тест виконується. Реле спрацьовує, і отриманий файл COMTRADE із релейного реєстратора перешкод можна отримати. З файлу COMTRADE можна виміряти час спрацювання реле, за винятком часових затримок для спрацювання релейного контакту (3 мс) і отримання аналогових даних (5 мс). Додавання 8 мс до виміряного часу спрацювання дає прийнятне значення  $15 \text{ мс} + 8 \text{ мс} = 23 \text{ мс}$  для часу спрацювання. На більш пізньому етапі, під час введення в експлуатацію, фактичний час спрацювання реле захисту можна перевірити за допомогою тієї ж послідовності випробувань на основі того самого тестового файлу, використовуючи тестовий набір серії SMRT або FREJA 500. У якості першого підходу зручно перевірити результати тестування з віртуального НМІ реле Digital Twin перед тим як почати більш глибокий аналіз записів подій або збоїв (Рис. 33).

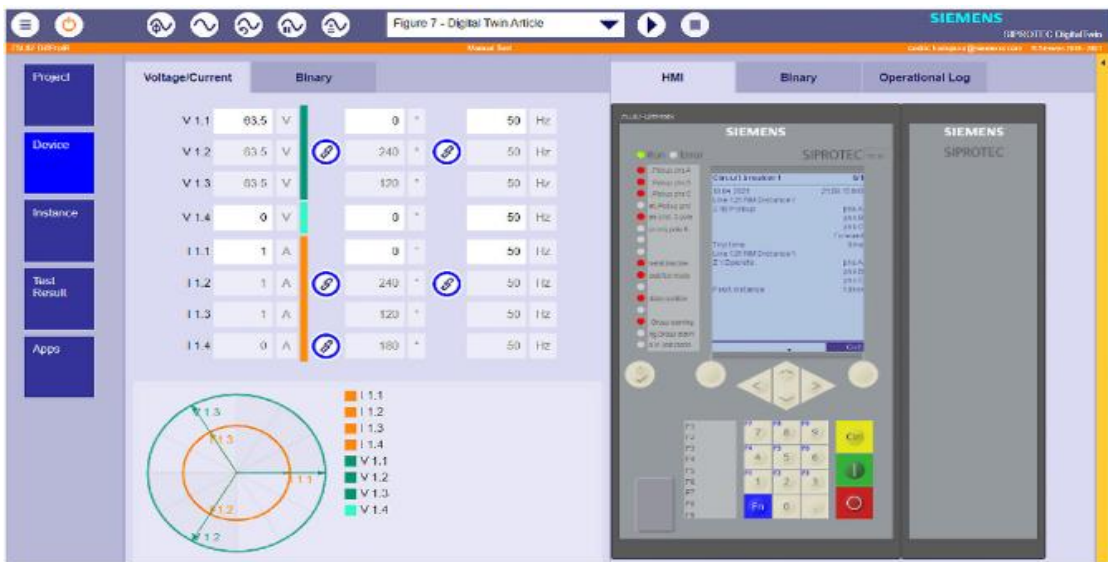


Рисунок 33. Файл COMTRADE було віртуально вставлено в реле Digital Twin, і результат є доступний у віртуальному HMI для першого аналізу. Реле SIPROTEC. У цьому прикладі відображення виконується для каналів напруги

#### *Вимірювання «неспрацювання» для несправності у зворотному напрямку*

Тестова послідовність, використана у першому випадку, може бути дещо модифікована для імітації несправності у зворотному напрямку. Припускаючи, що реле не повинно спрацювати за цих умов буде достатньо реверсувати всі струми замикання на 180 градусів і встановити максимальний час несправності, допускаємо, 3 секунди.

- експортувати файл COMTRADE із RTMS
- імпортувати файл COMTRADE до SIPROTEC Digital Twin.
- виконати зіставлення між сигналами COMTRADE (сигнали тестового набору) та віртуальними аналоговими входами віртуального реле.
- виконати тестування.

Тут результат можна легко перевірити, спостерігаючи за віртуальним HMI або світлодіодним індикатором віртуального відключення, щоб переконатися, що реле не спрацювало, або шляхом перевірки реєстратора подій, щоб підтвердити, що відключення не було записано. Немає необхідності завантажувати файл реєстратора збоїв (адже доступна будь-яка нова подія, що залежатиме від стратегії запуску), за винятком усунення несправностей після неправильної

роботи реле, яка може бути, наприклад, бути результатом неправильних налаштувань або неправильної конфігурації в логіці сигналу (CFC у Siemens DIGSI).

Останнє твердження вже починає демонструвати силу тестування розімкнутого контуру. Якщо налаштування реле неправильні або логіка реле неправильно налаштовано, ці проблеми будуть виявлені. І, здебільшого, ми не перевіряємо реле або тестовий набір, або навіть з'єднання – ми перевіряємо себе. Це так і повинно бути, тому що інженер є гарантом частини системи захисту.

*Перевірка простих кривих оберненого часу надструмів.*

Це дає уявлення про те, як виглядає робоча крива в площині I-t і програмне забезпечення RTMS може легко побудувати цю криву. Обираємо кілька точок на певних рівнях струму та звертаємо увагу на відповідний час роботи.

- виконуємо окремі тести, по одному для кожного вибраних поточних рівнів. Встановлюємо час несправності в тестовому наборі на 10 % або на 200 мс вище теоретичного значення.
- експортуємо файл COMTRADE, переносимо файл COMTRADE на Digital Twin, виконуємо необхідні зіставлення та запускаєм тестування. Перевіряєм роботу (відключення) за допомогою реле, HMI/LED індикації або списку подій
- виконуєм той самий тест, встановивши максимальний час несправності на 10 % або 200 мс менше, ніж теоретичний час спрацювання. Виконуємо тест і переконуємось, що реле не спрацьовує.

При правильно підібраних контрольних точках можна перевірити двоступеневу характеристику надструму (обернений час і незалежний час) за допомогою трьох або чотирьох контрольних точок (шість або вісім файлів COMTRADE).

### 3.1.6. З чим можна перевірити метод розімкненого контуру.

#### *Перевірка правильності налаштування груп*

Кожну групу установок, активовану в реле, необхідно перевірити під час введення в експлуатацію, що займає багато часу. Коли випробування виконуються с методом віртуального розімкненого контуру, вони більш економічні за часом і немає необхідності бути перед реле на підстанції – тести можна проводити з офісу чи дому, навіть до того, як реле буде увімкнено, фізично встановлено.

Наведені вище приклади можна екстраполювати для керування тестами для різних групи параметрів у Digital Twin. Пізніше, на етапі введення в експлуатацію, буде необхідно повторити лише деякі з цих тестів, щоб перевірити з'єднання до бінарних виходів. Крім того, віртуальні тести вже будуть успішно проведені, тому, якщо підключення правильні, то і висока ступінь впевненості в тому, що реальні випробування проходять гладко.

При введенні в експлуатацію, використовується свого роду «процедура тестування на технічне обслуговування». Застосовується процедура випробувань, і основним посиленням є віртуальні тести перед введенням в експлуатацію. Іншими словами, пусконалагоджувальні випробування будуть підмножиною віртуальних випробувань, оскільки сьогодні технічні випробування є підмножиною пусконалагоджувальних випробувань [36].

#### *Перевірка схем телезахисту*

Розглянемо практичний приклад дозвільної схеми телезахисту недосяжності для дистанційного захисту – PUTT. Перевірка цієї схеми захисту вимагає активації двійкового входу реле, пов'язаного з сигналом «прийом несучої». Сигнал прийому несучої виробляється тестовим набором реле шляхом активації двійкового виходу, який у реальному тесті підключений до бінарного входу реле. Залежно від того, наскільки реалістичним це має бути, їх два основні способи виконання віртуального тесту:

1) Простий підхід із використанням методу перевірки перед несправністю та несправністю, де несправність є твердою несправністю в релейній зоні 2.

Інструмент перевірки дистанційного захисту в RTMS можна використовувати для побудови характеристики реле та отримання напруги та струму як функції однієї суцільної несправності в зоні 2. Максимальний час несправності має бути вищим ніж очікуваний час роботи для зони 2, принаймні на 1 секунду.

- зберігаємо файл COMTRADE, переносимо його в хмару, виконуємо випробування та перевіряємо роботу реле дистанційного захисту у зоні 2 (яка, ймовірно, становитиме близько 400 мс).
- можемо використати список подій реле для цієї перевірки або перевірити приблизний час у записаному файлі порушень
- готуємо інший тест на основі попереднього, але цього разу тримаємо двійковий вихід тестового набору постійно активованим (закритим)
- виконуємо послідовність перед несправністю та несправністю з несправністю в зоні 2 і тестовий набір двійковий вихід активований (закритий). Зберігаємо файл COMTRADE
- цього разу файл COMTRADE міститиме інформацію про двійковий файл положення виходу (активовано) і форми сигналів напруги та струму
- передаємо файл COMTRADE у хмару, відобразимо аналогові сигнали, як зазвичай, зіставим сигнал надсилання несучої (двійкова вихідна позиція в файл COMTRADE) до правильного двійкового вхідного сигналу віртуального реле
- виконуємо перевірку і перевіряємо миттєву спрацювання реле дистанційного захисту за допомогою записаного файлу COMTRADE.

Цей тест не зовсім реалістичний, оскільки реле отримує несучу до того, як почнеться несправність, але в багатьох випадках він достатньо хороший.

2) Більш реалістичний тест із використанням секвенсора в RTMS.

- Готуємо таку послідовність у RTMS:
- КРОК 1: Значення перед несправністю, як у 1). Тривалість, 1 секунда.
- КРОК 2: Помилка в зоні 2 протягом 30 мс.
- КРОК 3: Така сама помилка в зоні 2, з активацією двійкового виходу 1. Це імітує, що реле на іншому кінці лінії запустилося/ввімкнулося (20 мс),

надіслало несучу, а несучій знадобилося 10 мс для досягнення тестового реле. Ці цифри більш ніж розумні. Крок 3 триватиме 1 секунду.

- зберігаєм файл COMTRADE і завантажуюмо його в хмару. Зіставляєм аналогові входи та цифрові сигнали, як у 1)
- виконуєм тест.
- перевіряєм миттєве спрацювання, як тільки реле прийме носій. Це має бути приблизно від 30 до 40 мс від появи несправності, залежно від часу усунення дребезгу бінарного входу реле. Скористаємось внутрішнім реєстратором збоїв, щоб перевірити правильну поведінку.
- повторюємо ту саму послідовність, що й вище, але не активуємо двійковий вихід тестового набору – залишаєм його відкритим (неактивним) протягом усього часу.
- експортуємо та завантажуюмо файл COMTRADE, зіставляєм аналогові та двійкові сигнали, запустимо тест.
- перевіряєм роботу реле в зоні 2.

#### *Швидкі тести з векторним генератором*

Простий векторний генератор є невід’ємною частиною хмарного сервісу Siemens. Для деякі з простіших тестів, можливо, швидше використовувати це для перевірки функціональності. Проте, недоліком є те, що не створюється тестовий файл, який може повторно використовувати під час введення в експлуатацію з набором для фізичного випробування. Це необхідно щоб налаштувати цей тест на льоту, але принаймні функція буде перевірена віртуально, тож ризик має бути мінімальний [10].

#### *Інші застосування віртуального тестування*

Є багато інших областей, які можуть отримати користь від віртуального тестування за допомогою Digital Twin. У багатьох програмах проблеми взаємодії викликають занепокоєння під час тестування, оскільки їх важко передбачити і часто усунення несправностей займає багато часу. Можливість використання віртуального тестування для перевірки блокування та відключення через зв'язок IEC 61850 GOOSE на станційній шині та усунення

всіх проблем до початку реального тестування є значною перевагою. Система автоматизації підстанції, включаючи шлюзи, локальний НМІ, несправність збір записів про несправності та зв'язок через IEC 61850 MMS, DNP3 або Modbus TCP також можна перевірити, щоб забезпечити безперебійне введення в експлуатацію. Цифровий двійник Digital Twin також дозволяє кільком інженерам захисту та автоматизації отримати доступ до тестової системи одночасно. Це можуть бути інженери однієї компанії або інженери, які працюють у різних компаніях, і це зручна функція, під час координації інтеграції обладнання від багатьох постачальників.

Оскільки відстані між сайтами в реальному світі можуть бути проблемою, віртуальне тестування інтерфейсів даних захисту для телезахисту або диференційного захисту програми в розподілених системах можуть принести велику користь.

### **3.2. Реле Easergy P3U30 та його функції.**

Лінійка від Schneider Electric Easergy P3 мають широкі цифрові можливості та захисні функції для електрообладнання середньої напруги з більш ніж 40 функціями захисту, включаючи вбудований дуговий захист та вбудовану віртуальну перевірку інжекції.

Це цифровий пристрій релейного захисту для розподільчих мереж 6-35 кВ для захисту фідера, двигуна та трансформатора. Разом із зручністю в експлуатації забезпечує високий рівень операційної ефективності, з точки зору економії часу для виробників електророзподільних пристроїв, а також з точки зору щоденного обслуговування завдяки універсальності застосування пристроїв РЗА. Зовнішній вигляд передньої панелі представлено на (Рис. 34).

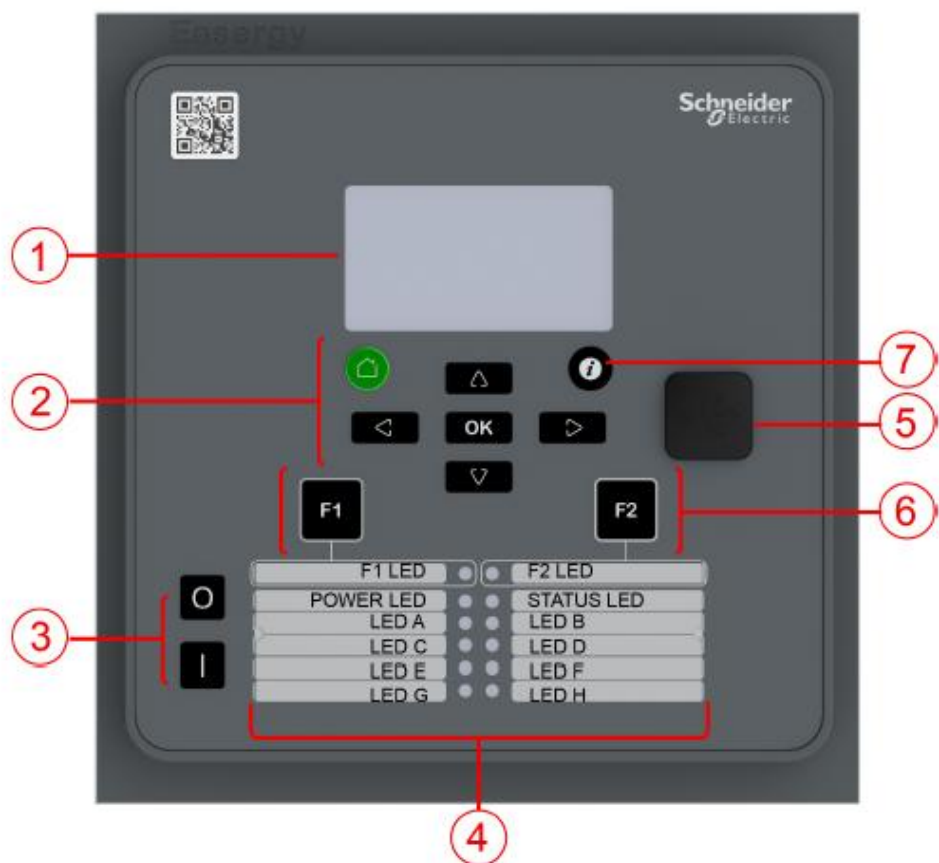













Рисунок 34. Передня панель Easergy P3U30 [12]

- 1 – рідкокристалічний дисплей
- 2 – кнопки навігації
- 3 – кнопки керування об'єкта
- 4 – світлодіодні індикатори
- 5 – локальний порт
- 6 - функціональні кнопки та світлодіоди, що показують їх стан
- 7 - Кнопка INFO

Функції кнопок передньої панелі  
Easergy P3U30

Таблиця 1

Кнопки	Функції
	Кнопка ПОВЕРНЕННЯ/СКАСУВАННЯ для повернення в попереднє меню. Щоб повернутися до першого пункту меню у головному меню, утримувати кнопку не менше 3 секунд.
	Кнопка INFO/Інформація для отримання додаткової інформації, переходу до введення пароля та регулювання контрастності РК-дисплея
	Програмована функціональна кнопка
	Програмована функціональна кнопка
	Клавіша ENTER/Введення для увімкнення або підтвердження функції
 	Кнопка навігації ВВЕРХ/ВНИЗ для переміщення вгору меню або збільшення/зменшення числового значення.
 	Кнопка навігації ВЛІВО/ВПРАВО для переміщення назад/вперед по меню або вибору цифри у числовому значенні
	Кнопка увімкнення автоматичного вимикача
	Кнопка вимкнення автоматичного вимикача

**Функції захисту Easergy P3U30:**

- універсальні функції захисту для налаштувань, що задані користувачем, таких як захист фідера, двигуна та захист за напругою від базової ненаправленого струмового захисту до спрямованого максимального струмового захисту, теплового захисту та АПВ;
- напруга нульової послідовності, захист від перенапруги та частоти, включаючи контроль синхронізму при включенні двох вимикачів;

- однолінійна схема , вимірювання та аварійні сигнали, що відображаються ЛМІ;
- конфігуровані користувачем взаємоблокування для управління основним об'єктом
- інжекція струму та напруги з використанням бази даних, шляхом встановлення відтворення файлу запису реєстратора аварійних подій із бази даних виробу.[12]

*Дане реле має такі види захисту:*

### Функції реле

Таблиця2

Код функції	Механізм функції	Застосування
ANSI 21FL	Визначення місця короткого замикання на фідері	фідер
ANSI 25	Контроль синхронізму	фідер, двигун
ANSI 27	Мінімальна напруга	фідер, двигун
ANSI 32	Захист активної потужності, спрямована	фідер, двигун
ANSI 37	Фазне падіння струму	фідер, двигун
ANSI 46BC	Обрив фази	фідер
ANSI 46	Максимальний зворотний струм послідовності	двигун
ANSI 47	Неправильне чергування фаз /Максимальна напруга зворотної послідовності	двигун
ANSI 48	Затягнутий пуск, блокування ротора	двигун
ANSI 49F	Тепловий захист	фідер
ANSI 49M	Тепловий захист	двигун
ANSI 50BF	ПРВВ	фідер, двигун
ANSI 50HS	Включення на несправність (МСЗ з прискоренням)	фідер, двигун
ANSI 50/51	Максимальний струмовий захист у фазах	фідер, двигун
ANSI 50N/51N	Максимальний струмовий захист від замикань на землю	фідер, двигун
ANSI 51C	Небаланс конденсаторної батареї	фідер
ANSI 51LR	Блокування ротора	двигун
ANSI 51V	МСЗ у фазах з корекцією по напрузі	фідер, двигун
ANSI 59	Максимальна напруга, лінійна або фазна	фідер, двигун
ANSI 59C	Захист конденсатора від перенапруги	фідер
ANSI 59N	Захист максимальної напруги нульової послідовності	фідер, двигун
ANSI 60	Контроль трансформатора струму	фідер, двигун
ANSI 60FL	Контроль трансформатора напруги	фідер, двигун
ANSI 66	Обмеження кількості пусків	двигун
ANSI 67	Максимальний спрямований струмовий захист у фазах	фідер, двигун
ANSI 67N	Максимальний спрямований струмовий захист від замикань на землю	фідер, двигун
ANSI 67NI	Захист від нестійких межуючих замикань на землю	фідер
ANSI 68F2	Визначення стрибків струму намагнічування	фідер, двигун
ANSI 68H5	Визначення п'ятої гармоніки	фідер, двигун
Код функції	Механізм функції	Застосування
ANSI 74	Контроль ланцюга відключення	фідер, двигун
ANSI 79	Функція автоматичного повторного включення АПВ	фідер
ANSI 81	Захист від підвищення або зниження частоти	фідер, двигун
ANSI 81R	Захист за швидкістю зміни частоти	фідер, двигун
ANSI 86	Утримання	фідер, двигун
ANSI 99	Вільно програмовані ступені	фідер, двигун

Реле має два режими роботи: фідер та двигун. В режимі фідера вторинні струми пропорційні значенням ТС, тоді як у режимі двигуна всі ступені захисту використовують номінальні значення струму двигуна.

Масштабування впливає на такі функції:

- Ступені захисту
- Вимірювання
- Реєстратор аварійних подій
- Розрахунок місця пошкодження.

### **3.2.1. Можливості налаштувань в програмі Easergy Pro.**

Реле обчислює значення RMS (діючі значення) кожного фазного струму та входу напруги. Мінімальні та максимальні значення RMS записуються та реєструються з відмітками часу з моменту останнього ручного очищення або з моменту перезапуску реле. Вони останніх 31 дні та останніх 12 місяців зберігаються в енергонезалежній пам'яті реле.

*Функції що підтримуються.*

Журнал подій - це буфер кодів подій та тимчасових міток, включаючи дату та час. Наприклад, кожен пуск включення-відключення, аварійне включення-відключення будь-який ступень захисту має унікальний код номера події. Такий код та відповідна мітка часу називаються подією.

Події є основними даними системи SCADA. Системи SCADA зчитують події з використанням будь-якого із доступних протоколів зв'язку. Журнал подій також можна переглянути з передньої панелі або Easergy Pro.

За замовчуванням у буфері є місце для 200 останніх подій. Розмір буфера подій може бути змінено від 50 до 2000. При зміні розміру буфера подій записані події стираються.

Осцилограф може використовуватися для запису всіх вимірюваних сигналів, струмів, напруги та інформації про стані дискретних входів (DI) та дискретних виходів (DO). Якщо частота дискретизації менше 1/10 мс, може бути записані також розраховані сигнали, такі як активна потужність,

коефіцієнт потужності, максимальне значення струмів зворотної послідовності тощо.

#### *Запуск запису*

Запис може бути ініційований будь-яким сигналом пуску або спрацьовування від будь-якого ступеня захисту, за допомогою дискретного входу, логічного виходу чи сигналів GOOSE. Сигнал пуску вибирається у матриці виходів (вертикальний сигнал DR). Запис може також запускатися вручну. Усі записи мають позначки часу.

#### *Читання записів*

Записи можуть бути вивантажені за допомогою програми Easergy Pro. Запис виконується у форматі COMTRADE. Це означає, що та інші програми можуть використовуватись для перегляду та аналізу записів, зроблених реле.

Внутрішній годинник реле використовується для міток часу подій та запису осцилограм. Внутрішній годинник повинен бути синхронізований зовнішнім сигналом синхронізації, щоб отримати порівняні мітки часу події для всіх реле в системі. Синхронізація заснована на відмінності внутрішнього часу та синхронізуючого повідомлення чи імпульсу. Це відхилення фільтрується та внутрішній час поступово коригується, щоб забезпечити нульове відхилення.

Захист Easergy P3 забезпечує безліч функцій якості електроенергії, які можуть використовуватися для оцінки, контролю та аварійної сигналізації якості електроенергії. Однією з найважливіших функцій якості електроенергії є контроль провалів та стрибків напруги.

Easergy P3 надає окремі журнали моніторингу провалів та стрибків напруги. Реєстратор напруги запускається, якщо на будь-якому з входів напруга або опускається нижче значення ( $U<$ ) або збільшується вище верхньої межі ( $U>$ ). У журналі несправності є чотири регістри для провалів та стрибків. Кожен регістр містить час початку, інформацію про фазу, тривалість, мінімальні, середні та максимальні значення напруги кожної

події провалів та стрибків напруги. Крім того, є лічильники загальної кількості провалів та кидків напруги, а також підсумкові таймери для провалів та кидків напруги.

Реле включає просту функцію для виявлення перерв напруги. Функція обчислює кількість перерв напруги та загальний час відключення напруги протягом даного календарного періоду. Період заснований на годиннику реального часу реле.

Найкоротший час перерви напруги, що розпізнається складає 40 мс. Якщо час перерви напруги коротший, воно може розпізнаватись залежно від відносної глибини зниження напруги. Якщо напруга була значно вищою за межу  $U_1 <$  а потім виникає маленький і короткий негативний стрибок, він не розпізнається

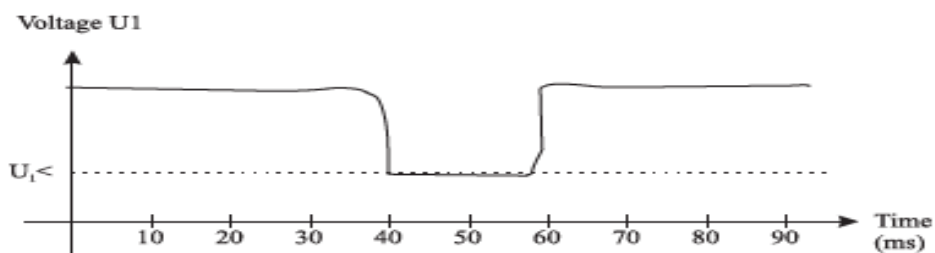


Рисунок 35. Короткочасна перерва напруги, що не розпізнається.

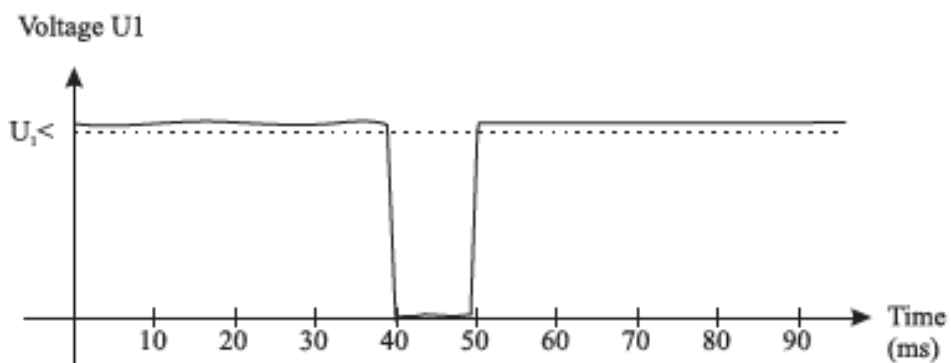


Рисунок 35. Короткочасна перерва напруги, що буде розпізнана.

Реле має функцію контролю стану, яка контролює знос автоматичного вимикача. Контроль стану може сигналізувати про необхідність технічного обслуговування вимикача до того, як стан вимикача стане критичним.

Функція контролю стану вимикача вимірює струм відключення кожного полюса окремо, а потім оцінює знос відповідно до допустимої діаграми циклу. Струм відключення реєструється, коли активовано реле відключення, кероване захистом відмови вимикача (ПРВВ).

Об'єднана інформація про статус ступенів струмових захистів - ця функція збирає інформацію про короткі замикання, тип замикань, реєструє струми замикань для всіх введених ступенів максимального струмового захисту та відображає їх у журналі подій.

Кожен ступінь захисту має два внутрішні двійкові вихідні сигнали: пуск та спрацювання. Сигнал пуску видається, коли виявлено несправність. Сигнал спрацювання видається після закінчення заданої затримки спрацювання, якщо несправність не зникне до закінчення часу затримки.

Є можливість визначення місця короткого замикання на введенні.

Реле включає алгоритм самостійного визначення місця ушкодження. Алгоритм може знайти коротке замикання у радіальних мережах, якщо реле, що знаходиться на введенні, з'єднане з ТС & amp; ТН так, що вимірюваний потік потужності має прямий (позитивний) напрямок. Якщо напрямки потоку вимірюваної потужності введення налаштовано зворотним, функція визначника місця короткого замикання не працює.

Місце пошкодження вказується як в одиницях опору (Ом), так в кілометрах або милях. Це значення передається потім, наприклад, разом із подією до системи диспетчеризації.

Дискретні входи та виходи ( а також віртуальні) доступні з метою управління. Налаштовуються вони в матричному меню.

Входи відповідають за зміну групи функцій, блокування / включення/ вимикання функцій, програмування логіки, вказують стан об'єкта. Дискретні входи активуються після подачі зовнішньої керуючої напруги (змінного чи постійного струму). Дискретні входи активуються після перевищення порогової напруги активації. Деактивація слідує, коли напруга падає нижче граничної межі.

Дискретні виходи називаються також керуючими виходами, сигнальними виходами та виходами самоконтролю. Дискретний вихід може бути налаштований як із утриманням, так і без утримання. Контакти реле, що спрацювали, повертаються у вихідний стан або кнопкою «Введення» на передній панелі реле або скиданням через ПО Easergy Pro.

Вибирають нормально відкритий або нормально закритий стан дискретного входу, а також встановлюють час затримки активації входу.

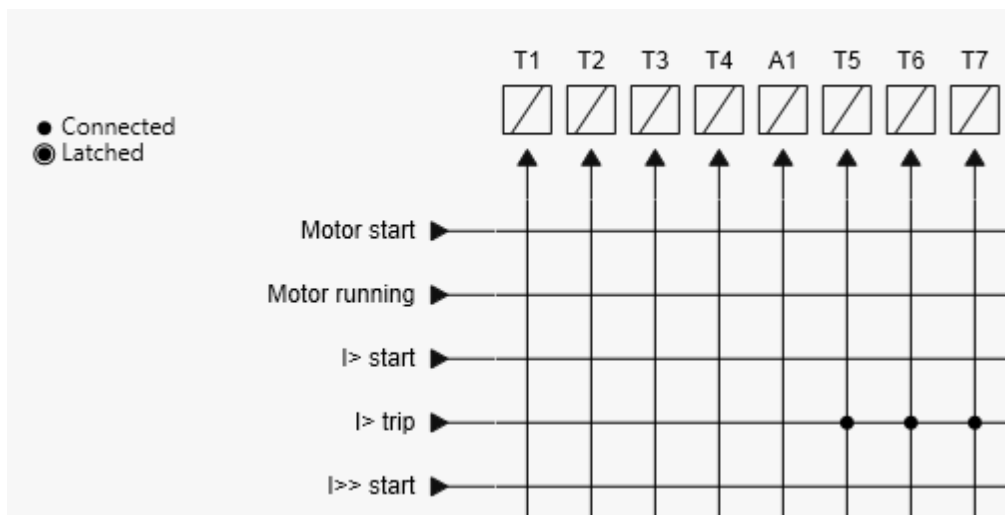


Рисунок 36. Підключення дискретних входів з утриманням або без у вікні «Матриця виходів».

В матриці програмування є доступні налаштування для цього:

- З'єднано (проста точка)
- З'єднано з утриманням (крапка у синьому колі)
- Не з'єднано (точка перетину ліній не позначена).

Реле має кілька матриць, які використовуються для конфігурації:

- матриця виходів - використовується для з'єднання сигналів ступенів захисту, дискретних входів, віртуальних входів, функціональних кнопок, управління об'єктами, логічного виходу, внутрішніх аварійних сигналів реле, сигналів GOOSE та сигналів фіксації виходів на виходи, тригерного входу реєстратора перешкод та віртуальних виходів;

- матриця блокування - для блокування любых ступенів захисту;
- матриця блокування об'єктів - для блокування керуванням об'єкту (для зв'язування дискретних входів, віртуальних входів, функціональних кнопок, виходів ступенів захисту, статусів об'єктів, логічних виходів, сигналів тривоги та сигналів GOOSE для заборони управління об'єктом, тобто вимикачами, роз'єднувачами та заземлюючих роз'єднувачів);
- матриця АПВ - використовується для керування автоматичним повторним включенням.

Для скидання утримань використовують панель інструментів в програмі Easergy Pro ( скидання(Release all lathes)), а також кнопками F1 та F2 і кнопками на передній панелі реле.

Залежний час роботи захисту Час спрацювання у залежному режимі визначається величиною сигналу, що вводиться. Чим більший сигнал, тим швидше ступінь видає сигнал спрацювання та навпаки. Розрахунок часу спрацювання скидається, якщо величина сигналу на вході ступеня падає нижче уставки пуску захисту.

Час спрацювання з незалежним часом роботи режиму - фіксується встановленням затримки спрацювання. Таймер затримки спрацювання захисту запускається одночасно з пуском та захистом. Після закінчення відліку часу таймером затримки видається сигнал спрацювання. Якщо сигнал на вході ступеня падає нижче рівня уставки, сигнал пуску обнуляється (Рис.38).

Отже, залежна затримка означає, що час спрацювання залежить від величини, яку захищають. Наприклад, для максимального струмового захисту із зворотнозалежною затримкою спрацьовування, чим більше струм тим менше час спрацювання. Альтернативою залежною затримкою є незалежна затримка спрацювання. У цьому випадку час спрацювання фіксований та не залежить від величини контрольованого параметра.

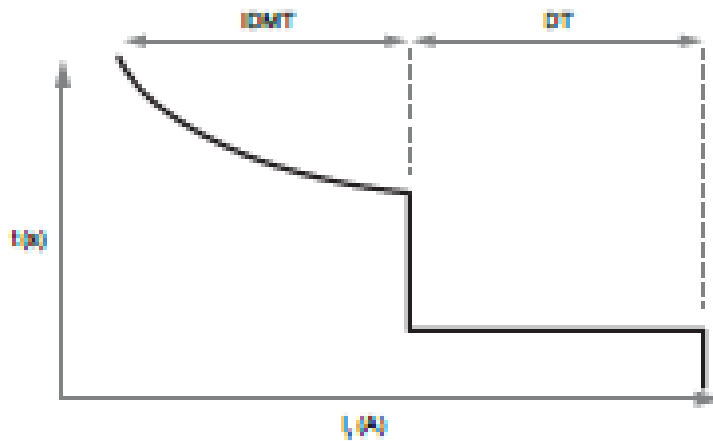


Рисунок 38. Криві з залежним (IDMT) та незалежним (DT) часом роботи захисту.

Є три режими використання характеристик залежного часу спрацювання захистів:

1. Стандартний час затримки - використання стандартного часу затримки шляхом вибору сімейства кривих (IEC, IEEE, IEEE2, RI) та типу затримки (нормальна зворотно залежна, дуже зворотно залежна і т.д.)

2. Формула стандартної затримки із вільними параметрами - вибір сімейства кривих (IEC, IEEE, IEEE2) та визначення власних параметрів обраної формули затримки. Цей режим активізується шляхом завдання типу затримки в меню 'Параметри', а потім редагування параметрів функції затримки A – E.

Повністю програмовані залежні характеристики затримки

3. Побудова характеристик шляхом встановлення 16 [струм, час] точок. Реле інтерполює значення між заданими точками за допомогою поліномів другого ступеня. Цей режим активується сімейством кривих налаштувань "PrgN". Одночасно доступно максимум три різні програмованих кривих. Кожна запрограмована крива може використовуватися будь-якою кількістю ступенів захисту.

Реле підтримує запрограмовану користувачем логіку для логічних сигналів. Зконфігурована користувачем логіка використовуватися для створення додаткової логіки у випадку, якщо це не передбачено в реле за замовчуванням.

Можна переглянути та модифікувати логіку у вікні налаштувань Загальна > Логіка в програмному забезпеченні Easergy Pro (Рис.39)

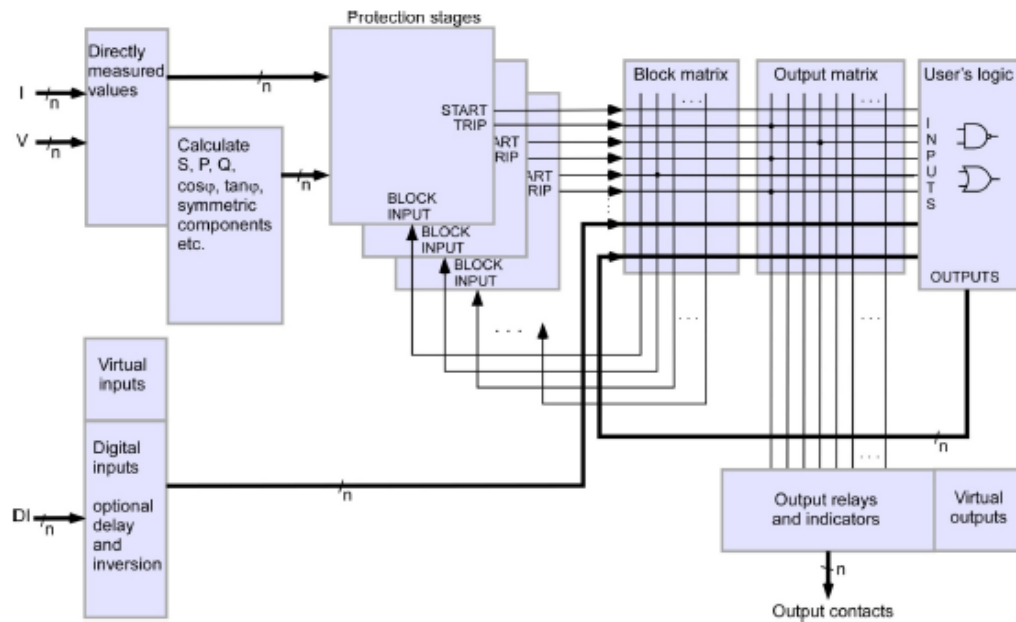


Рисунок 39. Матриця блокування та матриця виходів.

### 3.2.2. Віртуальне інжекційне тестування Easergy P3U30.

Віртуальні модуляції будемо проводити за допомогою Easergy Pro для нашої схеми захисту двигуна. Реле Easergy P3U30 підключено до вторинних кіл комутації трансформатора струму ТС 600/5 та трансформатора струму для вимірювання прямого струму замикання на землю ТС3 25/1 (Рис. 40)

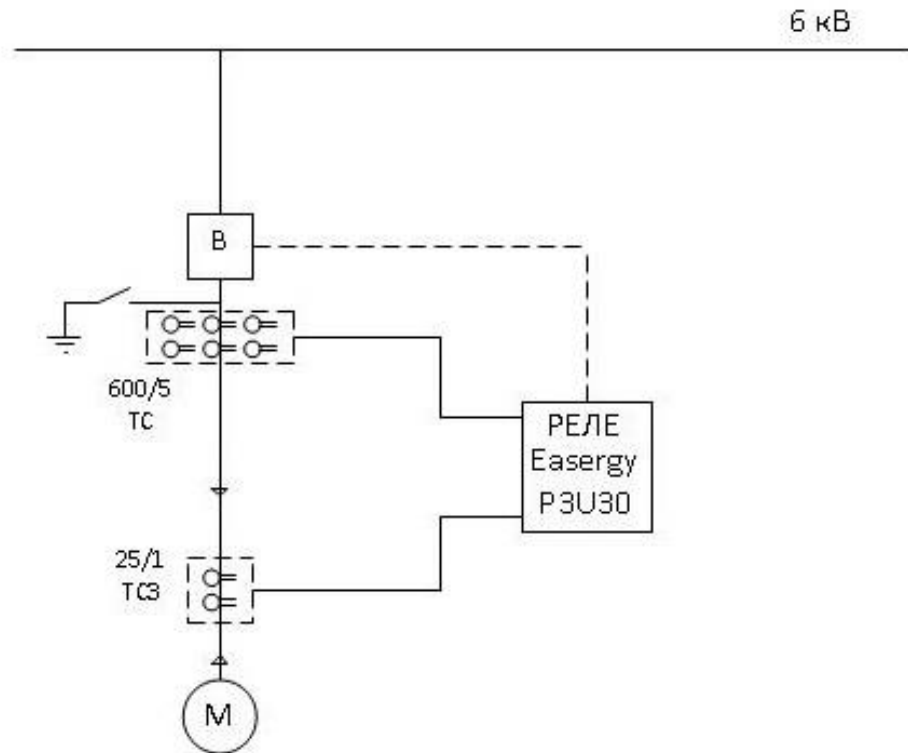


Рисунок 40. Однолінійна силова схема захисту двигуна.

Уставки захисту :

*МСЗ (максимальний струмовий захист):*

$I_{ном1ТА} = 600\text{А}$  – первинний номінальний струм трансформатора;

$I_{ном2ТА} = 5\text{А}$  - вторинний номінальний струм трансформатора.

$$I_{мах} = 1,3 \cdot I_{ном1ТА} = 1,3 \cdot 600 = 780 \text{ А, де} \quad (1)$$

$I_{мах}$  - струм спрацювання в первинних колах МСЗ.

$$K_{номТА} = I_{ном1ТА} / I_{ном2ТА} = 600/5 = 120 \text{ А}$$

$K_{номТА}$ - фактичне значення коефіцієнту трансформації ТС

$$I_{спр2} = I_{мах} / K_{номТА} = 780/120 = 6,5 \text{ А}$$

$I_{спр2}$  – струм спрацювання у вторинних колах комутації.

*Струмова відсічка:*

$$I_{мах'} = 8 \cdot I_{ном1ТА} = 8 \cdot 600 = 4800 \text{ А, де}$$

$$I_{мах'} - \text{струм спрацювання в первинних колах струмової відсічки.} \quad (2)$$

8 –коефіцієнт максимального значення навантаження ТС.

$$I_{спр2} = I_{мах'} / K_{номТА} = 4800/120 = 40 \text{ А}$$

$I_{\text{спр2}}$  – струм спрацювання у вторинних колах комутації.

*Захист від миттєвого замикання на землю:*

$I_0 = 10 \text{ A}$  – беремо струм по струму витoku на провідник.

Easergy P3U30 за замовчуванням увімкнено дисплей мнемосхеми на передній панелі. Вносимо зміни та задаємо параметри пристроїв нашої однолінійної силової схеми на дисплеї за допомогою програмного забезпечення Easergy Pro у розділі конфігурацій. Маємо відображення схеми та параметрів на дисплеї реле.

Задаємо значення трансформаторів струму, обираємо в матричному меню; підключаємо сигнали пуску і спрацювання до дискретних виходів та індикаторів, активуємо функцію запису аварійного журналу (DR), що в подальшому дає змогу формувати та переглядати файли COMTRADE.

Також виставляєм режим спрацювання незалежним від часу (DT) та режим роботи двигуна (Motor), де функції, що використовують сигнали струму, пов'язані з номінальним струмом двигуна в нашому випадку  $I_{\text{ном двиг}} = 600 \text{ A}$ .

У вкладці Захист меню Easergy Pro обираємо ANSI 50/51 Максимальний струмовий захист у фазах, який ми розраховали (1) і спостерігаємо, що уставки розраховані програмою реле співпадають з розрахунковими  $I_{\text{max}} = 780 \text{ A}$  (Рис.41).

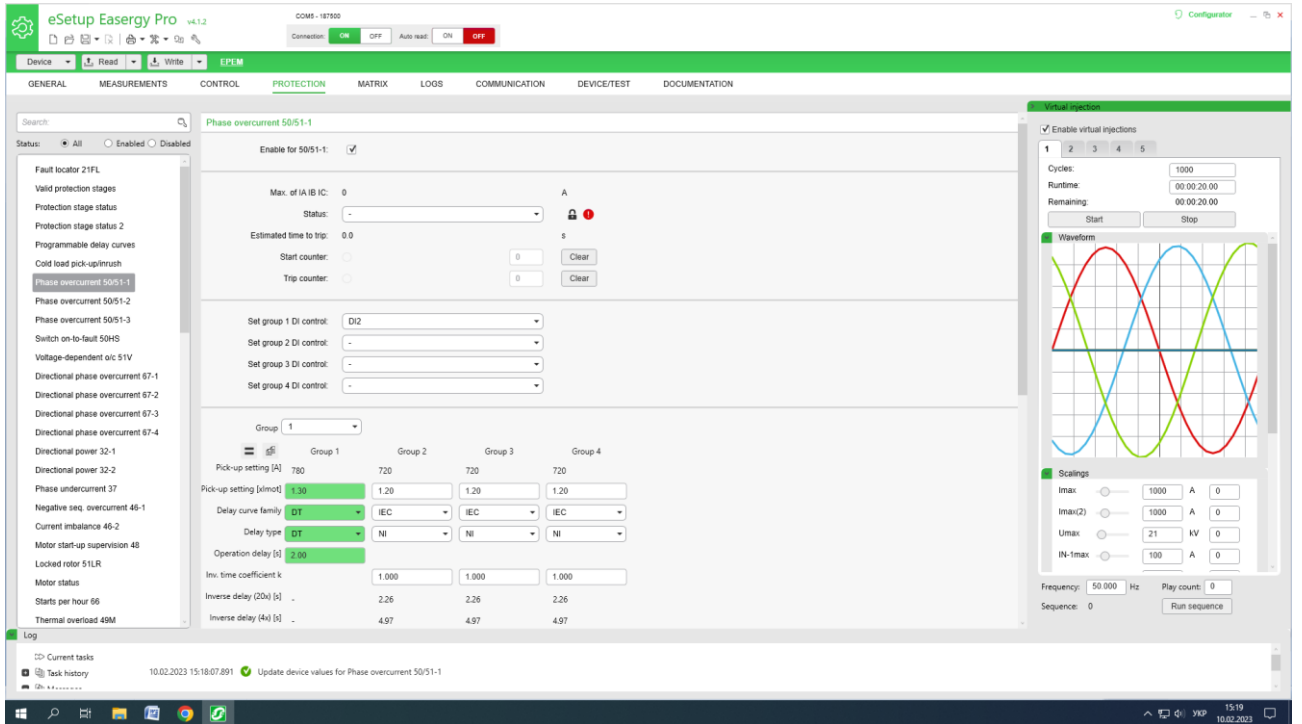


Рисунок 41. Налаштування Захисту. МСЗ 780 А.

Заповнюємо дані у вкладці Віртуальне інжекційне тестування (Virtual injection), де завищуємо струми в усіх трьох лініях  $I_A = 900$ ,  $I_B = 916$  А,  $I_C = 944$  А (Рис. 42) та починаємо тестування.

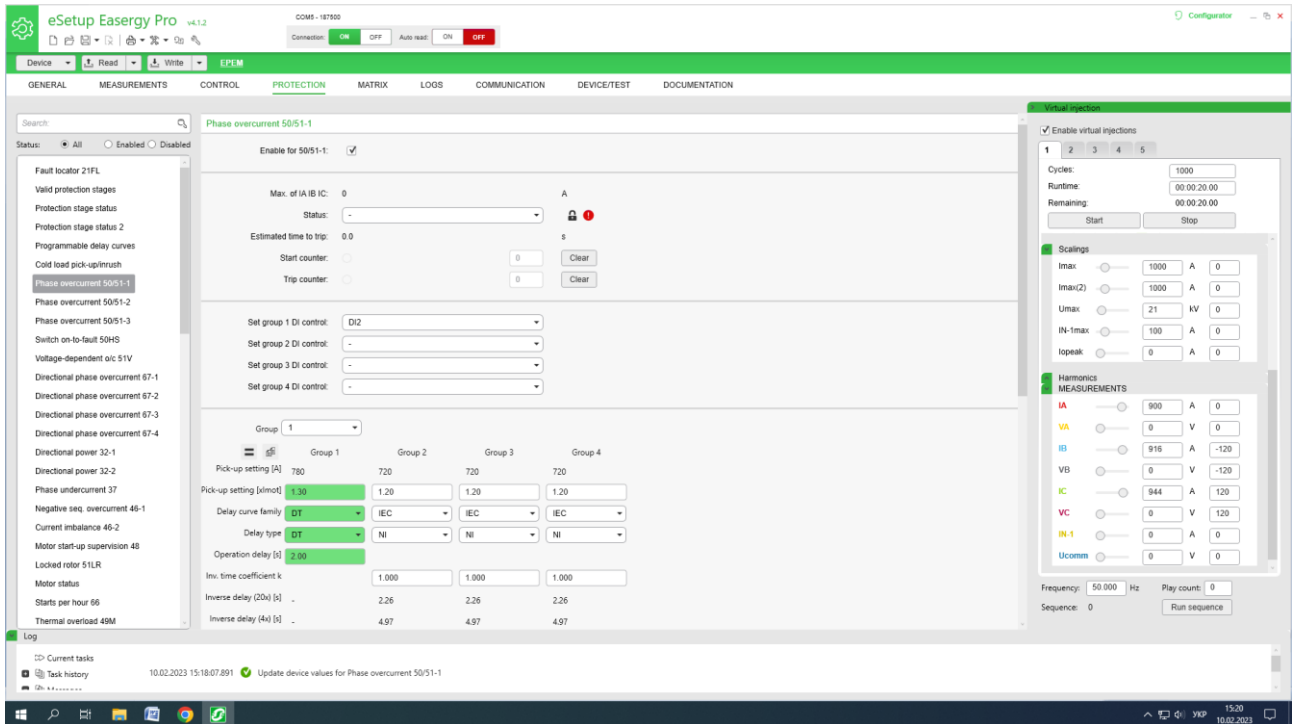


Рис. 42. Вкладка віртуальної інжекції. Уставка  $I_{\max} = 780$  А.  $I_{\max} = 1000$  А, 1000 циклів, струми в лініях:  $I_A = 900$ ,  $I_B = 916$  А,  $I_C = 944$  А.

Спрацьовує індикатор на передній панелі реле (Рис.43).



Рисунок 43. Спрацьовання індикатора на передній панелі реле Easergy R3U30 та відображення струмів ліній на дисплеї.

Формуємо файл COMTRADE (через запис в журналі реєстрацій подій) (Рис.44)

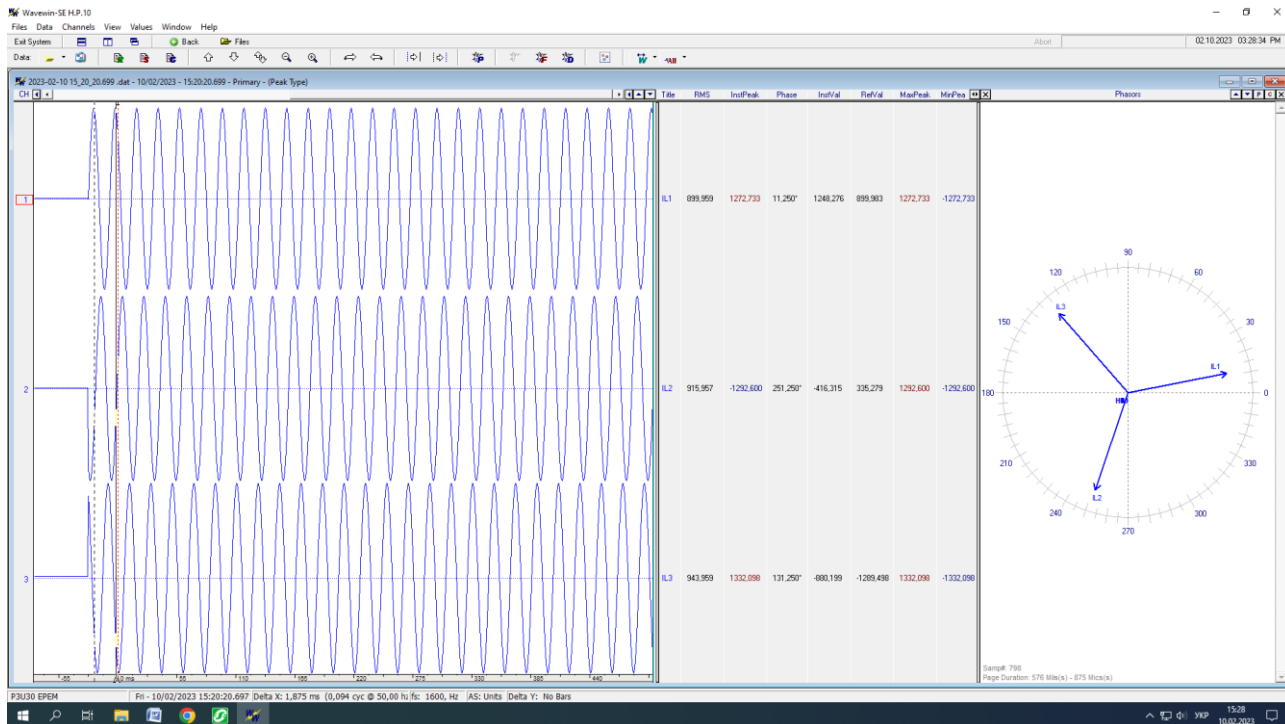


Рис.44 Файл COMTRADE. Затримка спрацювання 2секунди.

Є можливість, при зміні струмів в лінях, спостерігати зміну гармонік графічно (Рис.45).

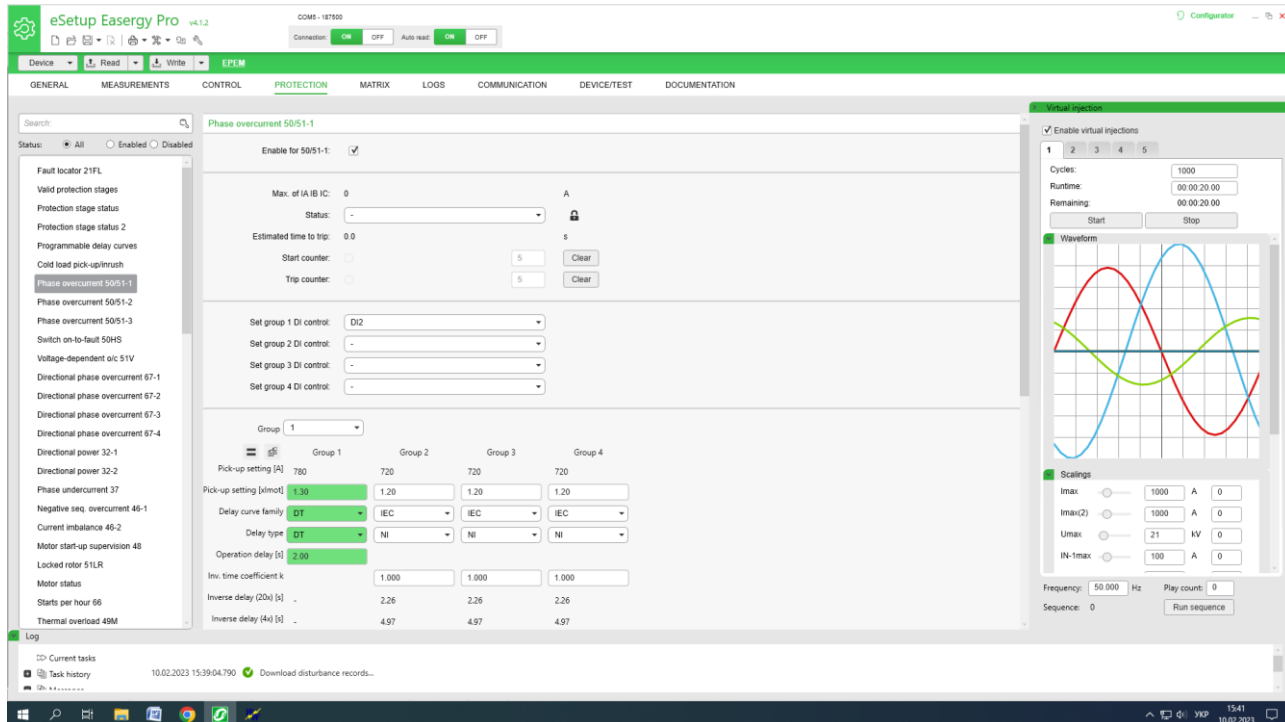


Рис. 45. Графічний вигляд гармонік.

Вигляд гармонік можна спотворювати та спостерігати зміни на графіку (Рис.46)

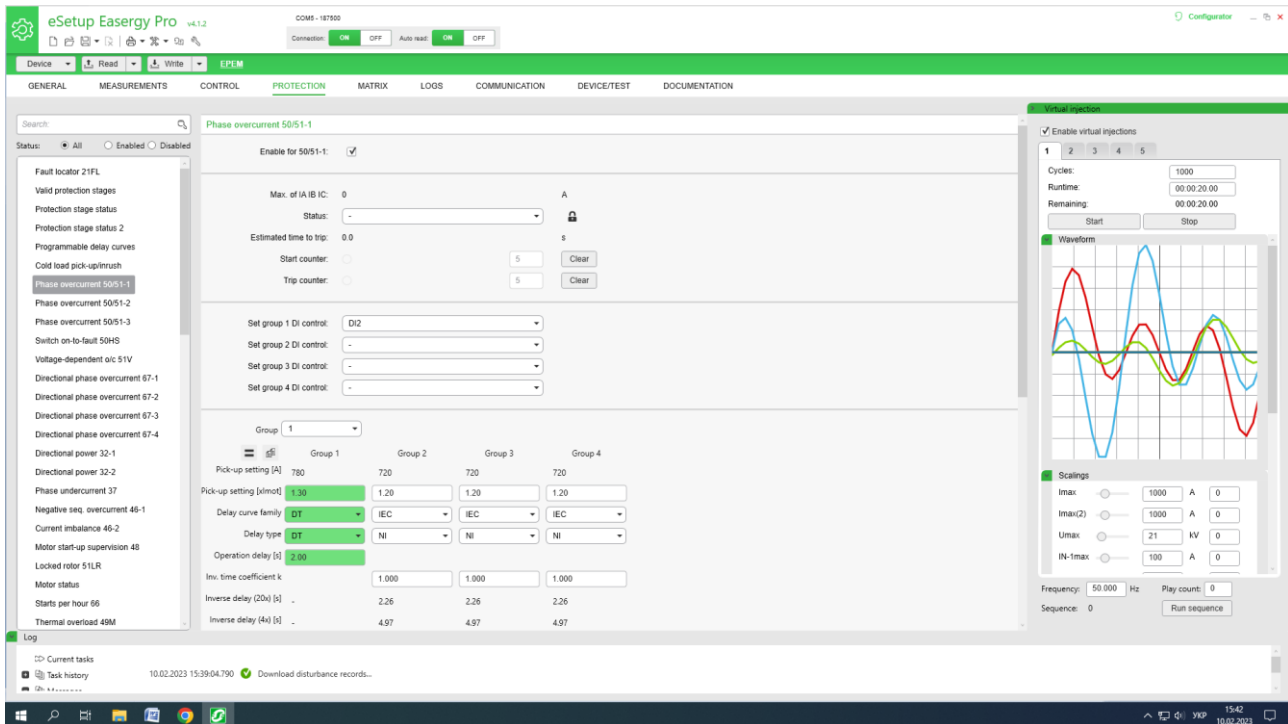


Рисунок 46. Спотворення гармонік.

Моделюємо струмову відсічку та фіксуємо, що розрахункові значення (2) співпадають з розрахунками програми  $I_{\max}' = 4800 \text{ A}$  (Рис.47).

У вкладці Віртуальна інжекція:  $I_{\max} = 5000 \text{ A}$   $I_{\max}' = 4800 \text{ A}$ , 2000 циклів.

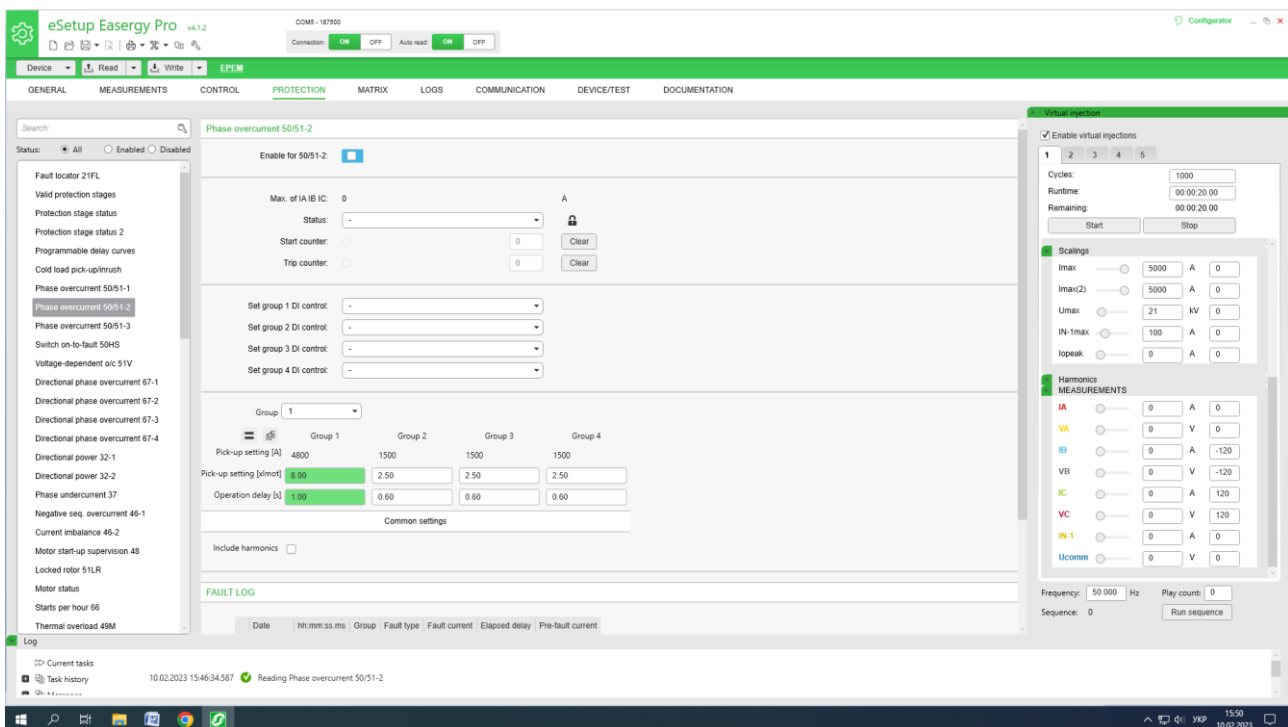


Рисунок 47. Вкладка Захист. Уставки спрацювання  $I_{\max}' = 4800 \text{ A}$ .

Переглядаємо файли COMTRADE. Піднімаємо струм в лінії поступово за допомогою повзунка (Рис. 48). Спрацьовує індикатор а передній панелі реле.

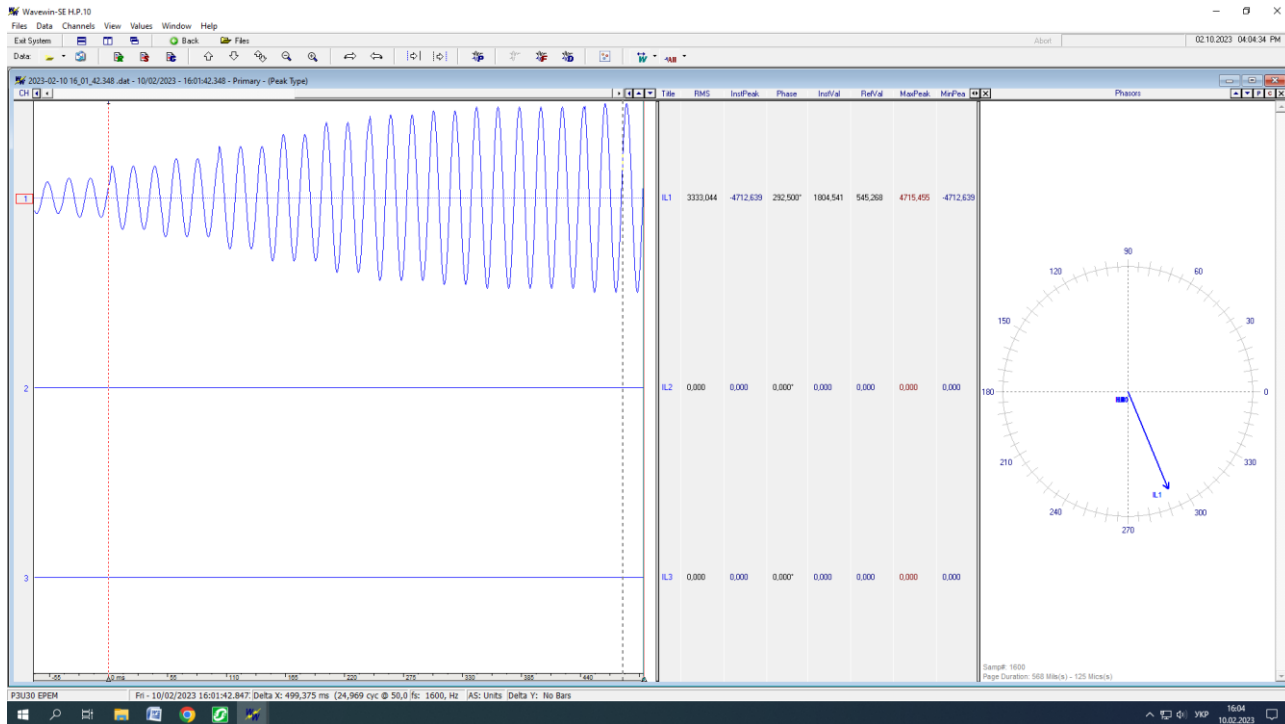


Рисунок 48. Підняття струму за допомогою повзунка. Час спрацювання 1 сек. Виставляємо одночасно завищені струми в усіх лініях та проводимо тестування (Рис. 49). Особливістю є те, що фіксуються тільки лінії, де відбулося спрацювання.

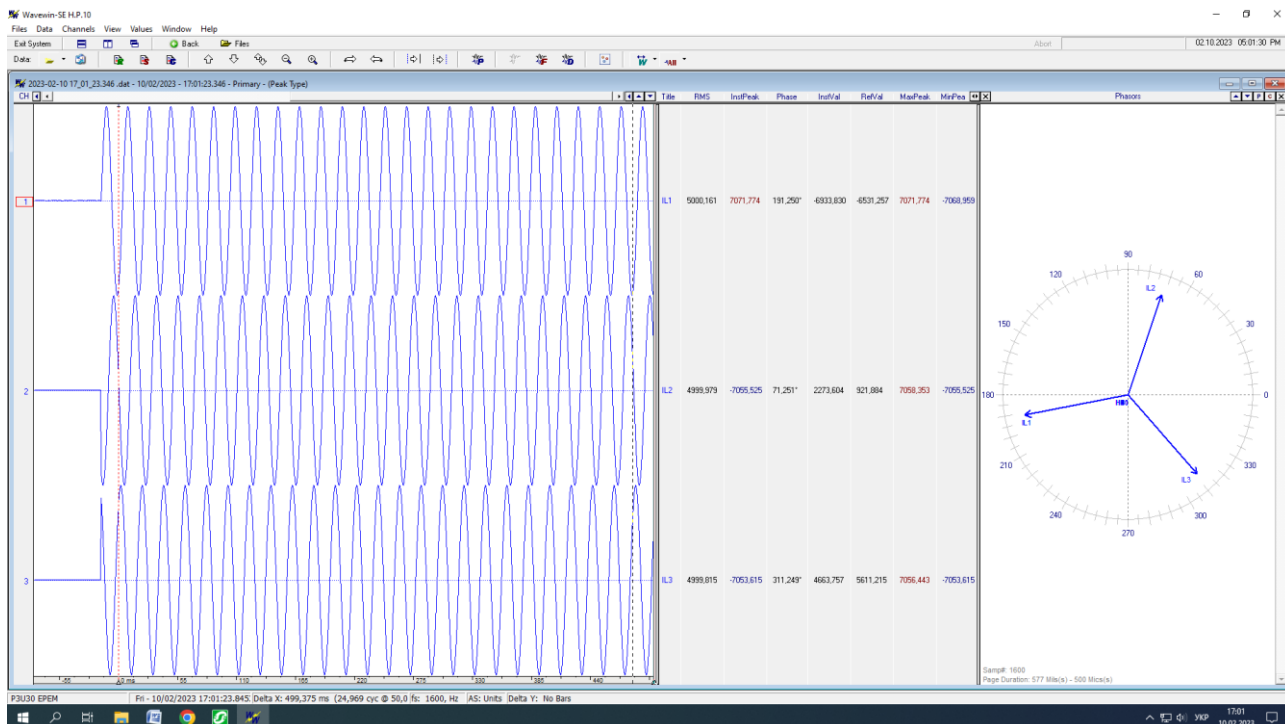


Рисунок 49. Високі струми в усіх лініях одночасно.

Моделюємо захист ANSI 59 Максимальна лінійна напруга. Для цього на Головній вкладці в реєстраторі збурень змінюємо канали запису: додаємо лінійні напруги VA, VB, VC.

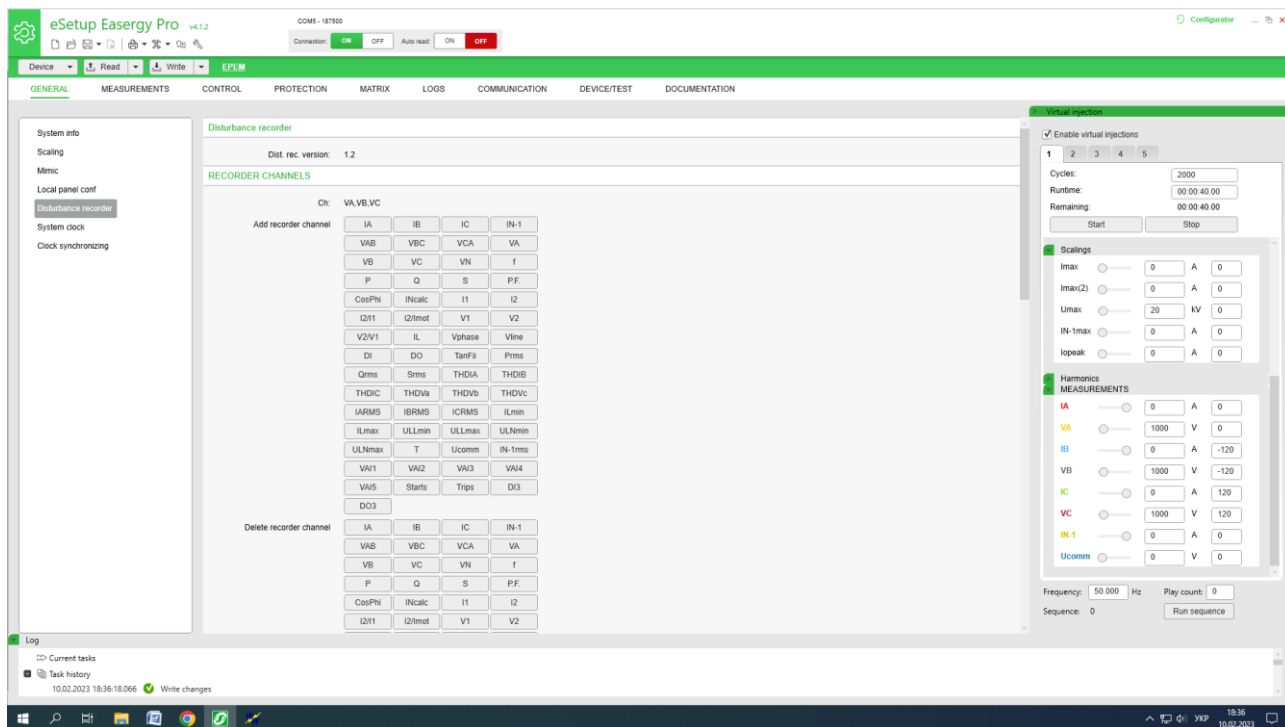


Рисунок 50. Реєстратор збурень. Лінійні напруги VA, VB, VC.

У вкладці Захист фіксуємо уставку спрацювання  $U_{\max} = 950$  В та у Виртуальній інжекції піднімаємо напруги на всіх лініях до 1000 В (Рис. 51).

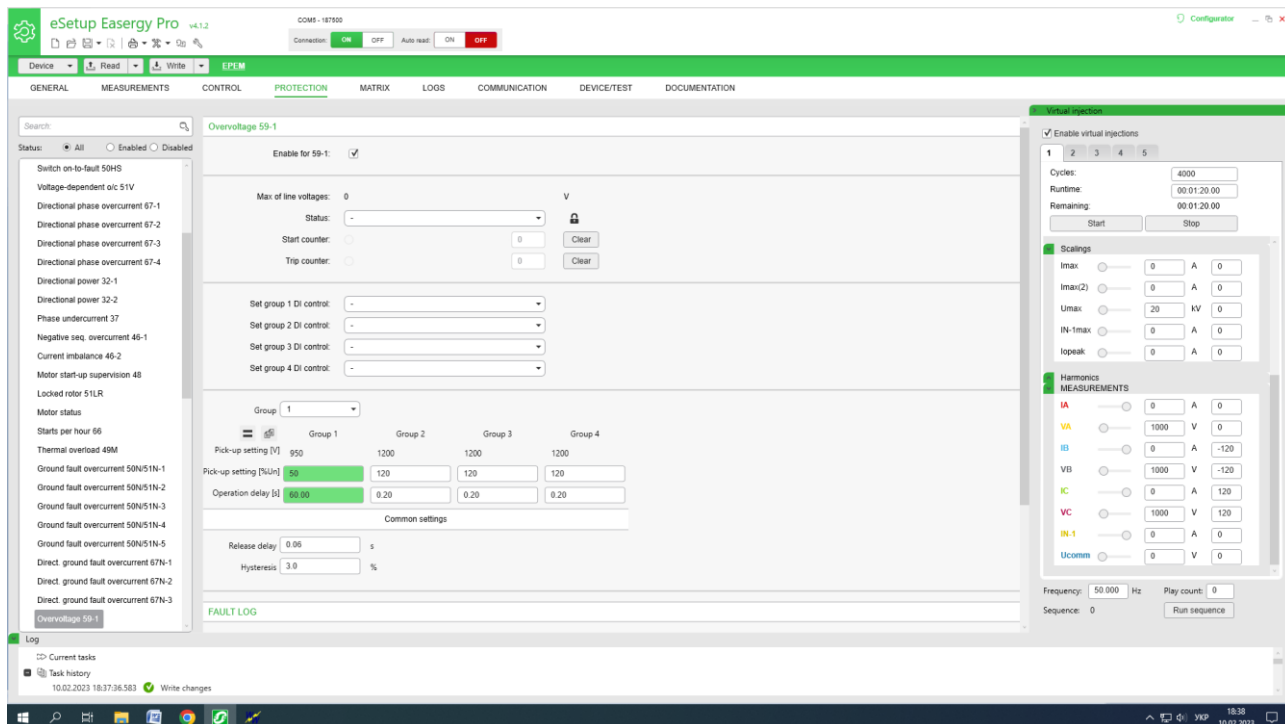


Рисунок 51. Вкладка Захист ANSI 59 Максимальна лінійна напруга.

## Формуємо файл COMTRADE (Рис. 52).

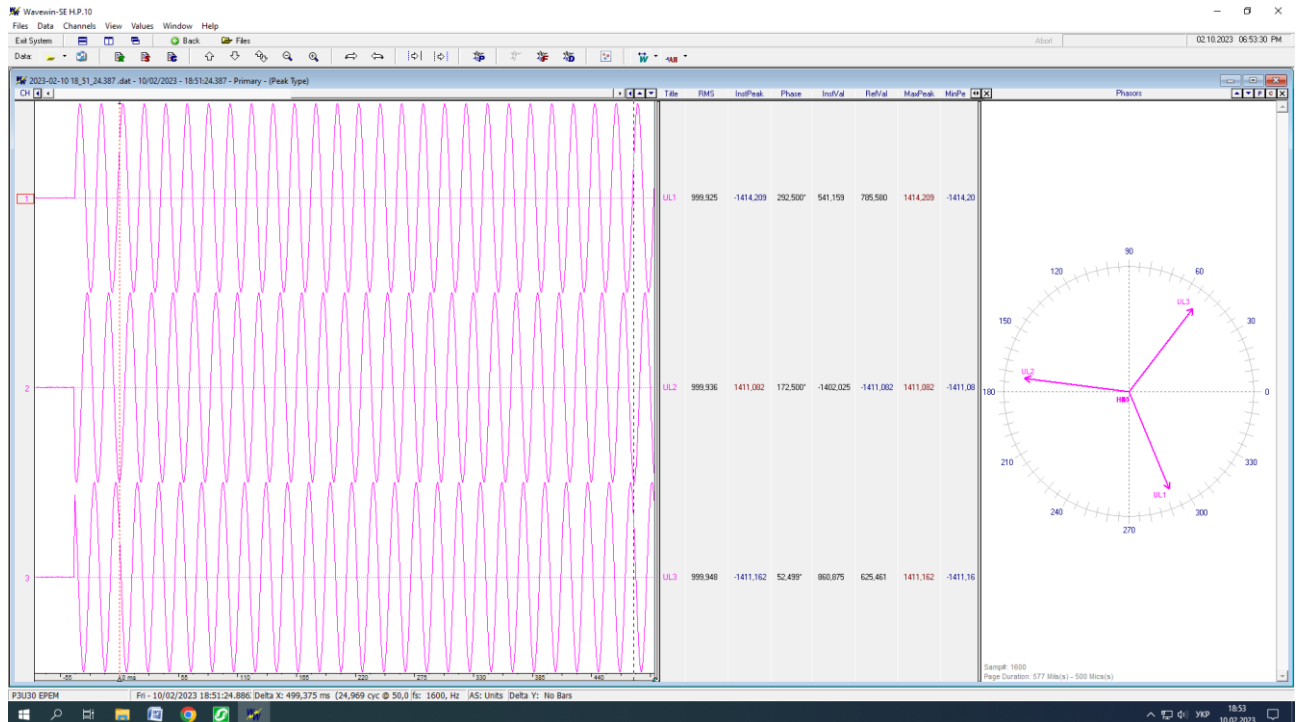


Рисунок 52. Файл COMTRADE. Час спрацювання 60 секунд.

Отже, Пуск захисту (Start) – коли включається таймер затримки спрацювання ступеня захисту. А саме Спрацювання (Trip), коли Ступінь захисту спрацювала, але несправність у мережі не зникла.

Під вікном закладок знаходиться докладна інформація про останні вісім аварійних подій для кожного з ступенів захисту. Зареєстровані значення специфічні для ступеня захисту і містять інформацію, таку як мітка часу, величина аварійного сигналу, час затримки, струм пошкодження, напруга пошкодження, фазовий кут та група налаштувань.

За замочуванням в буфері є місце для 200 останніх подій. Розмір буфера вручну можна змінити від 50 до 2000 подій. При зміні розміру буфера події, що були записані раніше, витираються.

### Висновки до третього розділу.

Отже, тестування в режимі віртуального тестування має цілий ряд переваг:

- 1) швидке налаштування та обробка даних;
- 2) можливість віртуального тестування без ризиків пошкодження обладнання;
- 3) можливість використання усіх видів та ступенів захисту;
- 4) налаштування з витримкою проміжку часу або кривими часу;
- 5) гнучкі налаштування для різних видів обладнання;
- 6) спостереження за електричними процесами через файли COMTRADE, які можна зберігати та використовувати результати для подальших тестувань, або просто переглядати в реальному часі.

До недоліків можна віднести:

- 1) непристосованість застарілого обладнання, а реконструкція займає багато часу та є дуже затратною;
- 2) нестача навченого кваліфікованого персоналу, які зможуть проводити роботу з даним обладнанням;
- 3) вартість системи захисту.

## ВИСНОВОК

В роботі досліджені та проаналізовані актуальні рішення щодо захисту енергосистеми за допомогою цифрових технологій в режимі віртуального тестування.

Основні наукові теоретичні та практичні результати полягають в наступному:

1. Проаналізовано сучасні методи перевірки пристроїв релейного захисту, в режимах замкненого та розімкнутого контурів.
2. Досліджено алгоритм та можливості віртуальних тестувань захисту і застосовано до двигуна мережі 6 Кв.
3. Віртуально протестовано три найпоширеніші функції захисту (МСЗ, струмова відсічка, максимальна напруга) та за допомогою програми Easergy Pro розраховано дійсні уставки спрацювання.
4. Відстежено збої живлення шляхом відтворення файлів COMTRADE, які вже є підготовленими, перевіреними та налаштованими для подальших моделювань захистів, що сприяє підвищенню надійності та безперебійності роботи енергосистеми.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] 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.
- [2] Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ Є.І. Сокол, Г.А. Сендерович, О.Г. Гриб та ін.- Харків: ФОП БРОВІН О.В., 2020. – 306 с.
- [3] Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання]: навч. посіб. / О.С. Яндульський, О.О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндульського. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 102 с. – Бібліогр.: с. 92 – 102.
- [4] <https://www.omicronenergy.com/en/company/>
- [5] «Developing automated Hardware-In-the-Loop tests with RTDS for verifying the protective relay performance» November 2016 DOI:[10.1109/CONCAPAN.2016.7942388](https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2016.7942388) Conference: 2016 IEEE 36th Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXVI) At: San José, Costa Rica
- [6] <https://www.rtds.com/applications/protection-systems/> Protection Systems – RTDS Technologies
- [7] [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=63592](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=63592) ДСТУ ІЕС 61850-5:2014 Комунікаційні мережі та системи на підстанціях. Частина 5.
- [8] <https://www.se.com/ua/uk/> Schneider Electric Україна| Світовий фахівець у галузі керування й автоматизації.
- [9] <https://new.siemens.com/ua/uk/produkty/enerhetyka/avtomatizatsiya-intelektualni-merezhi/electrical-digital-twin.html> Цифровий двійник енергомереж| Автоматизація та інтелектуальні...new.siemens.com.
- [10] ETi03\_VirtualTestingExtract.pdf  
[https://megger.widen.net/s/qnlmsxfd2v/eti03\\_virtualtestingextract](https://megger.widen.net/s/qnlmsxfd2v/eti03_virtualtestingextract).
- [11] «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Бунько В. Я. «Використання мікропроцесорних елементів релейного захисту в

розподільних пристроях енергосистем» DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.5-1/02>.

[12] «Easergy P3 Універсальні реле P3U10, P3U20 та P3U30» Версія видання: P3U/ru M/A002 Інструкція користувача.

[13] OMICRONenergy «Testing a distance relay teleprotection scheme» <https://youtu.be/7mNAalfSTVY>.

[14] OMICRONenergy «Проверки в ручном режиме с управлением от персонального компьютера» <https://youtu.be/PBRj2gf0Erc>.

[15] Schneider Electric «Easergy P3 – Virtual injection Test with eSetup Easergy Pro» <https://youtu.be/jYObqPodzSM>.

[16] Schneider Electric «Easergy P3 - Overcurrent protection setup with Easergy Pro» <https://youtu.be/s-kHDMIOO4k>.

[17] Schneider Electric «Easergy P5 – Discover the Virtual injection Test Feature| Schneider Electric» <https://youtu.be/AG74Pj5UpfY>.

[18] RTDS Technologies Inc. «Electric Machine Models for the RTDS Simulator; Application: Generator Protection & Control Testing» [https://youtu.be/V\\_KwgVoJ45Y](https://youtu.be/V_KwgVoJ45Y).

[19] Бунько В.Я. «Аналіз методів та засобів підвищення надійності елементів релейного захисту». Технологический аудит и резервы производства — No3/1(23), 2015 С.26-30.

[20] Засоби діагностування релейного захисту та автоматики електроенергетичних систем : навчальний посібник / В. М. Кутін, М. В. Кутіна, М. О. Ілюхін. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 120 с.

[21] Virtual relay design for feeder protection testing with online simulation/David Celeita, Juan David P´erez, Gustavo Ramos/ 0093-9994 (c) 2017 IEEE.

[22] P. M. Anderson, Power system protection. [recurso electrónico]., ser. IEEE Press power engineering series. New York : McGraw-Hill : IEEE Press, c1999., 1999. [Online]. Available: <http://ezproxy.uniandes.edu.co:8080/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cacat00683a&AN=udla.704538&lang=es&site=eds-live&scope=site>

- [23] D. Montenegro. (2013) DSSim-PC, Electrical Distribution System Simulator for PC. Universidad de los Andes. [Online]. Available: <https://sourceforge.net/projects/dssimpc/>
- [24] W. group, “Comtrade: a new standard for common format for transient data exchange,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 4, pp. 1920–1926, October 1992
- [25] M. Kezunovic, J. Domaszewicz, V. Skendzic, M. Aganagic, J. K. Bladow, S. M. McKenna, and D. M. Hamai, “Design, implementation and validation of a real-time digital simulator for protection relay testing,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. pp. 158–164, January 1996.
- [26] P. G. McLaren, K. Mustaphi, G. Benmouyal, S. Chano, A. Girgis, C. Henville, M. Kezunovic, L. Kojovic, R. Marttila, M. Meisinger, G. Michel, M. S. Sachdev, V. Skendzic, T. S. Sidhu, and D. Tziouvaras, “Software models for relays,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 2, pp. pp. 238–245, April 2001.
- [27] M. B. Miranda, “Virtual reality in the operation and protection relay in substations,” in *10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change*, IET, Ed., Manchester, 2010.
- [28] A. P. S. Meliopoulos and G. J. Cokkinides, “A virtual environment for protective relaying evaluation and testing,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 1, pp. pp. 104–111, February 2004.
- [29] D. Celeita, M. Hernandez, G. Ramos, N. Penafiel, M. Rangel, and J. D. Bernal, “Implementation of an educational real-time platform for relaying automation on smart grids,” *Electric Power Systems Research*, vol. 130, pp. 156–166, 2016.
- [30] W. Guo-yang, S. Xin-li, T. Yong, Z. Wu-zhi, and L. Tao, “Modeling of protective relay systems for power system dynamic simulations,” in *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition (PSCE)*, Phoenix, 2011.
- [31] I. G. Kuli, A. Marui, and G. Leci, “Protection relay software models in interaction with power system simulators,” in *2012 Proceedings of the 35th International Convention MIPRO*, May 2012, pp. 924–929.

- [32] D. Celeita, S. Zambrano, and G. Ramos, "Fault location framework for distribution systems with DG using DSSim-PC," in 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA). IEEE, Sept 10-13 2014, pp. 1–6.
- [33] D. Celeita, J. D. Pico, and G. Ramos, "Protection coordination analysis under a real-time architecture for industrial distribution systems based on the std iee 242-2001," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. PP, no. 99, p. 7, March 2016.
- [34] S. Electric. (2016) Network protection automation guide - npag. [Online]. Available: <http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/energy-distribution/automation/npag.page>
- [35] IEEE/IEC Measuring relays and protection equipment Part 24: Common format for transient data exchange (COMTRADE) for power systems - Redline IEEE Std C37.111-2013 (IEC 60255-24 Edition 2.0 2013-04) - Redline, IEEE Std., April 30 2013
- [36] EPRI, "Grid transformation workshop results: Advanced reading material product id 1024659," Electric Power Research Institute EPRI, Tech. Rep., April 2012.
- [37] Multiple current injection relay test sets,' EE Publishers, Nov. 07, 2012. <https://www.ee.co.za/article/megger-393-11-multiple-current-injection.html>