

ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРОВИХ ТЕРМІНАЛІВ ЗАХИСТУ

В. П. Пліс¹¹Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. У зв'язку з розвитком технологій на зміну електромеханічним реле, що широко застосовується в електроенергетиці, прийшли багатофункціональні цифрові термінали релейного захисту. Для навчання студентів та електротехнічного персоналу підприємств необхідні нові підходи до створення експериментальних стендів, які дозволять вивчити особливості застосування цифрових захистів та повною мірою розкрити їхні можливості. Мета роботи – підвищення якості знань та практичних навичок, які студенти отримують при роботі з блоками цифрового захисту. Для досягнення мети розроблено спеціалізований лабораторний стенд для тестування цифрових терміналів захисту. Стенд складається з математичної моделі об'єкта, що захищається, і технічних засобів, завдяки чому параметри режиму моделі перетворюються на фізичні сигнали і в реальному часі подаються на реальний цифровий пристрій. Дослідження елемента, що захищається, забезпечується в характерних режимах його роботи, близьких до реальних, шляхом забезпечення зв'язку між терміналом релейного захисту та інформаційною моделлю. Обладнання, що використовується на стенді, не вимагає значних капітальних вкладень, тому такий підхід доступний більшості проектних і навчальних організацій.

Ключові слова: цифровий термінал захисту, експериментальний стенд, аналого-цифровий перетворювач; цифро-аналоговий перетворювач, математична модель, асинхронний двигун.

Вступ

При виході з ладу енергосистеми необхідно своєчасно отримувати дані про несправності, що дозволить своєчасно відреагувати, локалізувати аварію та відновитись після неї.

Релейний захист разом із системою інформації про несправності є основою для аналізу та усунення несправностей в енергосистемі. При великих масштабах енергосистеми та складності несправності роль релейного захисту стає все більш важливою та підвищує рівень інтелекту системи диспетчеризації для забезпечення безпечної роботи енергосистеми [1].

Вміння фахівців правильно розраховувати параметри спрацьовування релейного захисту та автоматики (РЗА), налаштовувати пристрої РЗА підвищує надійність роботи та безпеку експлуатації електроустановки. Саме тому важливо ще на етапі навчання у вищому навчальному закладі здобути не лише теоретичні знання, а й практичні навички роботи із сучасним обладнанням. Для досягнення цієї мети застосовують учбові лабораторні стенди.

Останнім часом широкого поширення набуло використання мікропроцесорного захисту у системі електропостачання. Головною перевагою таких захистів є функціональність. Функції реле струму, реле напруги, реле частоти та реле часу можуть виконуватись одним пристроєм.

© Пліс В. П., 2023

Мікропроцесорні захисти компактніші, мають високу точність вимірювань і гнучкість налаштування, досить легко інтегруються в систему диспетчерського управління і збору даних. Також вони дозволяють автоматично реєструвати параметри в аварійних режимах для їх подальшого аналізу [2].

Призначення релейного захисту – швидке відключення пошкодженого елемента чи ділянки енергосистеми від неушкоджених частин. Ускладнення мереж електропостачання, наявність різних режимів роботи, а також використання альтернативних джерел енергії вимагають подальшого вдосконалення пристроїв захисту електрообладнання в аварійних режимах. Це зумовлює питання проектування нових видів захисту із змінними алгоритмами роботи та попередніх випробувань їх в умовах, максимально наближених до реальних. Найбільш ефективним способом таких випробувань є імітаційне моделювання, за допомогою якого можна перевірити працездатність нових пристроїв та отримати початковий досвід їх експлуатації.

1. Аналіз існуючих рішень

Більшість сучасних промислових зразків навчальних стендів з пристроями релейного захисту [3] являють собою конструкції з декількома реле та мнемосхемою (рис. 1). Такі стенди багатофункціональні. Передбачається, що робота виконується у два етапи. На першому етапі розраховуються параметри захисту, а на другому етапі

задаються параметри спрацьовування захисту та перевіряється правильність його роботи.

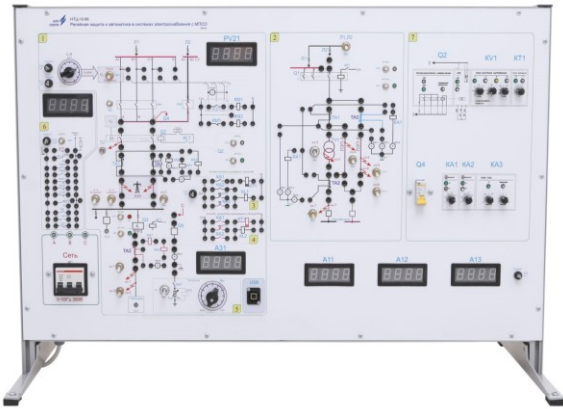


Рис. 1. Лабораторний стенд «Релейний захист та автоматика в системах електропостачання».

Важливою навичкою для сучасного фахівця є вміння працювати з мікропроцесорними терміналами. Саме тому окремо необхідно виділити навчальні стенди з використанням мікропроцесорного релейного захисту [4]. У терміналах цього типу можна встановити набагато більше параметрів, ніж, наприклад, в електронних реле.

Дані конструкції стендів дозволяють навчитися користуватися обладнанням та перевірити правильність його роботи, але через особливості конструкції не дають можливості розкрити всі можливості мікропроцесорних терміналів, а також забезпечити достатню гнучкість під час їх модернізації.

Існують також віртуальні лабораторні стенди, що розробляються у спеціальному програмному забезпеченні, такому як MATLAB, LabView та ін. [5, 6, 7, 8]. Приклад віртуального лабораторного стенду представлено рис. 2.

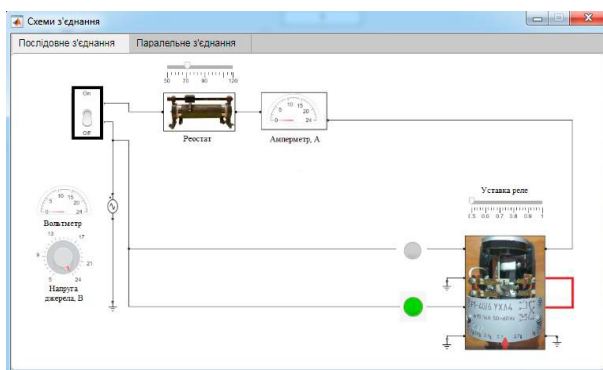


Рис.2. Приклад віртуального лабораторного стенду з релейного захисту та автоматики.

Вони відрізняються високою гнучкістю та можливістю моделювання різноманітного обладнання. Такі стенди є найбільш економічними та мають перевагу за кількістю лабораторних робіт, які можна моделювати, але в цьому випадку сту-

денти не набувають навичок роботи з реальним обладнанням.

Поєднанням розглянутих вище стендів є навчальні стенди, де спочатку виконується розробка та перевірка комп'ютерної моделі енергосистеми у програмі, а потім за допомогою пристрою для перевірки роботи терміналів подаються реальні струми або напруги на реле, що досліджується. Для цієї роботи використовуються спеціальні програмні модулі, які можна придбати у комплекті із пристроєм для перевірки роботи терміналів. Прикладом є модуль «Сума гармонік», призначений для створення як складних систем впливу, так і сигналів складної форми. Вигляд вікна програми «Гармоніки» наведено на рис. 3.

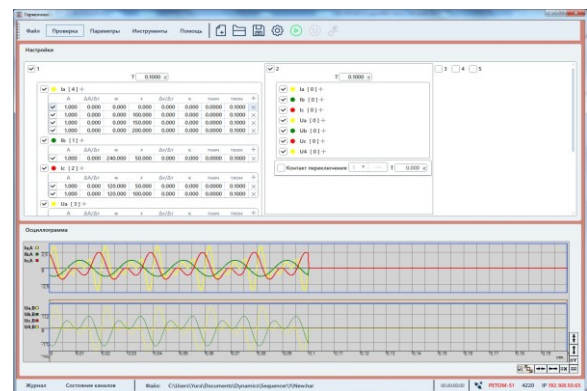


Рис. 3. Вікно програми «Гармоніки».

Програмні модулі дозволяють моделювати більш складні стани системи, розглядати не тільки аварійний, а й до- та після-аварійний режими, й режими переходу однофазного КЗ в двофазне тощо. За допомогою параметрів вищих гармонік можна врахувати спотворення сигналу і моделювати режими, наближені до реальних. Завдяки цьому можна повніше розкрити можливості мікропроцесорного терміналу, а студенти отримають необхідні навички роботи з реальним обладнанням.

Якщо реакцію енергосистеми не враховувати, працездатність пристроїв релейного захисту можна перевірити за допомогою програмно-апаратних випробувальних комплексів [9]. Приклад такого комплексу на базі пристрою Omicron CMC 356 показано на рис. 4.

Найбільш ефективним методом, що застосовується при розробці, для тестування та оптимізації вторинного електрообладнання, а також для дослідження енергосистеми у перехідних та аварійних режимах є цифрове моделювання в реальному часі з фізичним підключенням пристроїв релейного захисту до моделі [10].



Рис. 4. Апаратно-програмний випробувальний комплекс на базі пристрою CMC 356 фірми OMICRON.

Симулятори RTDS (Real Time Digital Simulator) дозволяють проводити комплексне тестування пристроїв релейного захисту та автоматики (РЗА) з повноцінним зворотним зв'язком та реакцією на зміну їх стану, а також поєднувати реальні пристрої з віртуальною моделлю їхнього робочого середовища [11, 12, 13]. Це сучасний тренд. Такі симулятори можуть оновлювати вихідні дані в режимі реального часу, що означає, що всі розрахунки, необхідні для моделювання схеми з використанням алгоритму Доммеля [14], виконуються в реальному часі, що дорівнює або менший за крок моделювання за часом. За допомогою RTDS можна досліджувати енергосистеми у статичному та динамічному режимах, а також тестувати пристрої релейного захисту, навчати та проводити стажування персоналу, підвищуючи його кваліфікацію. Приклад RTDC показано на рис. 5 [15].

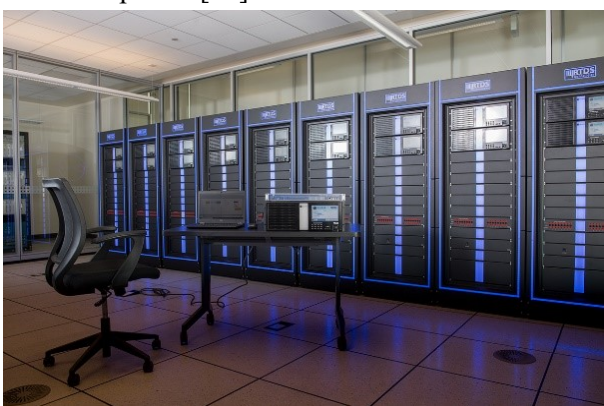


Рис. 5. Апаратно-програмний випробувальний комплекс RTDS.

Пристрій, що перевіряється, «сприймає» комплекс моделювання як реальне середовище і реагує на процеси, дуже близькі до реальних, отримуючи негайний відгук віртуальної енергетичної системи на вплив, що виробляється. Це

дає можливість перевірити пристрій РЗА спільно з моделлю об'єкта, на якому ці пристрої будуть встановлені.

Основною перевагою симуляторів RTDS є можливість включення реального обладнання до моделі досліджуваної енергосистеми. Останнім часом енергетичні компанії багатьох країн світу дедалі ширше використовують симулятори RTDS. За останні десятиліття моделювання в режимі реального часу перестало бути експериментальною технологією для виконання лише досвідчених проєктів, а стало повсякденним інструментом, що використовується енергетичними компаніями для вирішення найрізноманітніших практичних завдань [16].

2. Мета роботи

Мета роботи полягає у підвищенні якості здобутих знань та практичних навичок роботи з цифровими терміналами захисту студентів вищих навчальних закладів та виробничого електротехнічного персоналу шляхом застосування оригінального доступного підходу, що базується на сучасних тенденціях, при розробці експериментальних стендів для тестування цифрових захистів.

3. Опис експериментального стенду

Переваги симуляторів RTDS є очевидними. Проте їхня вартість дуже висока, внаслідок чого для більшості проєктних, дослідницьких та навчальних закладів вони не доступні. Більш доступним способом реалізації стенду для випробування терміналів релейного захисту (ТРЗ) є застосування персонального комп'ютера (ПК) у комплексі з аналого-цифровими (АЦП) та цифро-аналоговими (ЦАП) перетворювачами. Спрощену структурну схему такого рішення представлено на рис. 6.

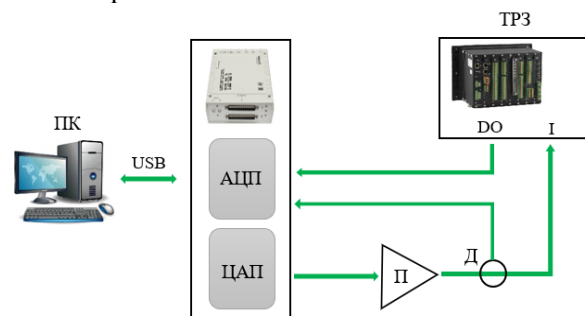


Рис. 6. Структурна схема стенду.

У ПК створюється модель елемента енергосистеми, що захищається, яка дозволяє отримати миттєві значення струму у фазах елемента в нормальних і аварійних режимах. Наявність реакції

ТРЗ на режими, що моделюються, і її швидкість дозволить оцінити правильність або не правильність функціонування захисту.

Результати розрахунку миттєвих значень струму моделі за допомогою ЦАП і підсилювача сигналу (П) передаються на струмові входи ТРЗ (І). Реакція захисту фіксується за допомогою сигналу з налаштованого відповідним чином дискретного виходу блоку (DO), що передається до АЦП. Контроль миттєвих значень струму, що протікає через ТРЗ, забезпечується вимірювальним перетворювачем (Д), дані якого також передаються в АЦП.

В даному стенді в якості АЦП і ЦАП використані плати LTR11 і LTR34 крейтової системи LTR компанії L-Card. Плата LTR11 – 14-бітний 32-канальний АЦП з максимальною частотою дискретизації 400,0 кГц, а LTR34 – 16-бітний 8-канальний ЦАП з роздільною здатністю 16 біт. Вибір пристрою, що тестується здійснюється оператором за допомогою ПК, підключеного до системи LTR через інтерфейс USB. Бібліотеки доступу до функцій пристрою надаються виробником мовою програмування C++. Зовнішній вигляд двомісного крейту показано на рис. 7.



Рис. 7. Двомісний крейт LTR-EU-2.

Модель, що використовується в розробленому стенді і описується як приклад, являє собою ділянку системи, що складається з понижуючого трансформатора (Т) і кабельної лінії (W). Схема моделі до розрахунку представлена на рис. 8.

Праворуч від схеми показані параметри елементів для обраного варіанта завдання. За цими даними можна розрахувати параметри спрацьовування захисту. Щоб переконатися у правильності налаштування терміналу захисту, моделюються режими роботи захисту та оцінюються його чутливість та селективність. Як захист цих елементів застосовується двоступінчастий струмовий захист: струмова відсічка (код ANSI 50) і максимальний струмовий захист (код ANSI 51) з незалежною витримкою часу [17].

Перевірка правильності функціонування захистів проводиться в наступних характерних режимах: 1) режим самозапуску навантаження, 2) струм однофазного короткого замикання (КЗ) у

точці К₃ у мінімальному режимі роботи енергосистеми; 3) мінімальний струм двофазного КЗ у точці К₂ також у мінімальному режимі.

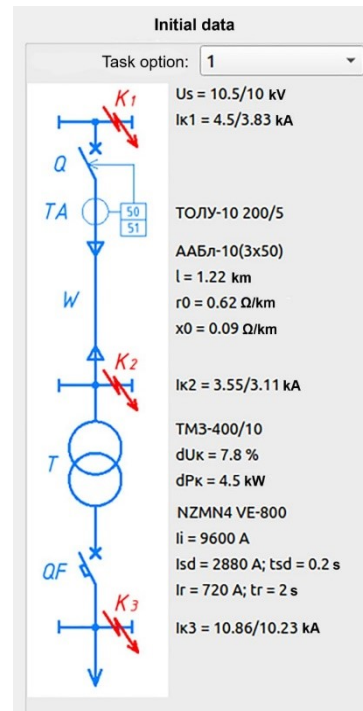


Рис. 8. Схема моделі для розрахунку та параметри елементів.

Розглянуті захисти реалізовані з використанням цифрового ТРЗ Siemens Siprotec 4 7SJ6, призначеного для захисту приєднань 6-35 кВ (рис. 9).



Рис. 9. Термінал цифрового релейного захисту Siprotec 4 7SJ6.

Налаштування параметрів спрацьовування захисту може бути виконано як за допомогою кнопок на лицьовій панелі пристрою, так і за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (DIGSI).

Програма дозволяє автоматично послідовно моделювати раніше розглянуті режими роботи для заданого користувачем номера варіанта та в процесі моделювання перевіряється справність

захисту та видаються відповідні службові повідомлення.

4. Порядок роботи зі стендом

Вказується варіант завдання. На підставі наданих програмою даних підбираються параметри роботи двоступінчастого струмового захисту із незалежною характеристикою спрацьовування (встановлюється на високовольтний вимикач Q) (рис. 7). Захист повинен бути перевірений на чутливість та селективність.

Порядок розрахунку для прикладу, що описується, наступний.

Визначаються номінальні струми трансформатора Т за формулами:

$$I_{нВН} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{нВН}}, \quad (1)$$

$$I_{нНН} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{нНН}}, \quad (2)$$

де S_n – номінальна повна потужність трансформатора, кВА;

$U_{нВН}$ – номінальна напруга первинної обмотки трансформатора Т (ВН – висока напруга), кВ;

$U_{нНН}$ – номінальна напруга вторинної обмотки трансформатора Т (НН – низька напруга), кВ.

Далі визначаються робочі максимальні струми трансформатора для первинної та вторинної обмоток:

$$I_{р.макс.ВН} = K_{рез.} \cdot I_{нНН}, \quad (3)$$

$$I_{р.макс.НН} = K_{рез.} \cdot I_{нНН}, \quad (4)$$

де $K_{рез.}$ – коефіцієнт резервування.

Номінальний струм автоматичного вимикача QF визначається за умовою:

$$I_n \geq I_{р.макс.НН}. \quad (5)$$

Приймається найближче більше стандартне значення струму та вибирається автоматичний вимикач.

На наступному етапі розрахунку визначається номінальний струм розчіплювача автоматичного вимикача QF за умовою

$$I_{расц.} \geq I_{р.макс.НН}. \quad (6)$$

З урахуванням 20% похибки автоматичного вимикача визначається уставка часу захисту від перевантаження QF ($t_{пер.}$), виходячи з наступної умови:

$$0.8 t_{сз}^{I_{пер.}} \left(\frac{I_{пер.}}{I_{расц.}} \right) \geq t_{сзн.}, \quad (7)$$

де $t_{сзн.}$ – час самозапуску, с;

$I_{пер.}$ – струм перевантаження, А.

Значення струму перевантаження розраховується за формулою:

$$I_{пер.} = K_{сзн.} \cdot I_{р.макс.НН}, \quad (8)$$

де $K_{сзн.}$ – коефіцієнт самозапуску.

Далі визначається уставка спрацьовування другого ступеня захисту автоматичного вимикача QF. Струм спрацьовування захисту повинен перевищувати струм перевантаження з урахуванням похибки автомата.

$$I_{sd} \geq K_{нлг.} \cdot I_{пер.}, \quad (9)$$

де $K_{нлг.}$ – коефіцієнт налагодження.

З іншого боку, необхідно забезпечити селективність захисту за струмом з першим ступенем захисту лінійних автоматичних вимикачів

$$I_{sd} \geq K_{нлг.} \cdot I_{i.макс.}, \quad (10)$$

де $I_{i.макс.}$ – найбільший струм уставки захисту лінійних автоматичних вимикачів, А.

Перевіряється чутливість другого ступеня захисту автоматичного вимикача QF до короткого замикання на шинах НН трансформатора Т

$$I_{sd} \leq \frac{I_{кз.мін.}^{(2)}}{1.25}, \quad (11)$$

де $I_{кз.мін.}^{(2)}$ – мінімальний струм КЗ у точці K_3 , А.

Для селективної дії з лінійними автоматичними вимикачами задається максимальна уставка спрацьовування першого ступеня захисту автоматичного вимикача QF. Приймається $I_i = 1.2 \cdot I_{расц.}$

Для захисту лінії W та трансформатора Т від струмів короткого замикання на вимикачі Q застосовується двоступінчастий захист.

Далі проводиться визначення параметрів спрацьовування відсічки (перший ступінь) [18]. Струм спрацьовування відключення відбудовується від максимального струму короткого замикання на шинах низької напруги трансформаторної підстанції за наступною умовою:

$$I_{сз}^I \geq K_{нлг.} \cdot \frac{I_{кз.макс.}^{(3)}}{K_T}, \quad (12)$$

де K_T – коефіцієнт трансформації трансформатора T ;

$I_{кз.макс}^{(3)}$ – максимальний струм короткого замикання на шинах низької напруги трансформаторної підстанції, А.

Перевірка чутливості відсічки проводиться за такою формулою:

$$K_u \geq \frac{K_{сх.}^{(2)} I_{кз.мін}^{(2)}}{K_{сх.}^{(3)} I_{сз}^I}, \quad (13)$$

де $K_{сх.}^{(2)}$, $K_{сх.}^{(3)}$ – коефіцієнти схем, при двофазному та трифазному КЗ відповідно.

Необхідно враховувати розкид параметрів вимикача (25%), помилок реле (5%) та трансформаторів струму (10%), незбуджених пристроїв (5%). У зв'язку з цим, струм спрацьовування максимально-струмового захисту (МСЗ) (другий ступінь) визначається за формулою:

$$0.85 I_{сз}^{II} \geq 1.3 \frac{I_{сз.QF}}{K_T}. \quad (14)$$

Далі виконується перевірка чутливості реле максимального струму

$$K_u \geq \frac{K_{сх.}^{(1)} I_{кз.мін}^{(1)}}{K_{сх.}^{(3)} I_{сз}^{II} K_T}, \quad (15)$$

де $K_{сх.}^{(1)}$ – коефіцієнт схеми при однофазному КЗ.

Визначається час спрацьовування МСЗ за формулою:

$$t_{сз}^{II} \geq t_{сз.QF} + \Delta t, \quad (16)$$

де $t_{сз.QF}$ – уставка часу спрацьовування автоматичного вимикача QF , с;

Δt – ступінь селективності, с.

За допомогою спеціального програмного забезпечення (DIGSI), що надається виробником реле захисту або безпосередньо з терміналу, результати розрахунків і коефіцієнт трансформації трансформатора струму вводяться в реле захисту.

Щоб запустити режим тестування натисніть відповідну кнопку, розташовану в лівому нижньому куті головного вікна програми. У разі некоректної роботи захисту процес моделювання припиняється і виводиться повідомлення про помилку з коментарями, що дозволяє користувачеві визначити та усунути причину несправності.

5. Висновки

Був розроблений експериментальний стенд, який забезпечує можливість проведення випро-

бувань цифрових терміналів релейного захисту в контрольованих лабораторних умовах з урахуванням унікальних характеристик кожного захищеного елемента. Цей стенд представляє собою інноваційний і високотехнологічний засіб для дослідження і вдосконалення захисних систем в електроенергетичних мережах.

Враховуючи різноманітність захищених об'єктів та елементів, стенд здатен працювати з різними моделями реле та іншими компонентами захисних пристроїв, що дозволяє дослідникам та інженерам аналізувати та порівнювати різні сценарії дії релейних захисних систем у реальних умовах.

Окрім проведення тестів на імітаційних моделях, стенд дозволяє виконувати експерименти з реальними об'єктами та реле, що забезпечує більш точні та достовірні результати. Завдяки цій можливості, інженери можуть вивчати реальні реакції системи захисту на різні виклики та динамічні навантаження, що забезпечує оптимальне налаштування та підвищення ефективності релейного захисту.

Стенд має інтуїтивний та зручний інтерфейс, який дозволяє легко налаштовувати параметри випробувань та збирати дані для подальшого аналізу. Використання спеціалізованого програмного забезпечення дозволяє автоматизувати процес тестування та забезпечити більш швидкий та ефективний аналіз результатів.

Іншою важливою характеристикою стенда є його гнучкість і можливість розширення. Використовувані програмно-технічні засоби дозволяють додавати термінали захисту різних виробників і створювати нові програмні моделі об'єктів захисту, такі як лінії електропередач, трифазні трансформатори тощо, що значно розширює можливості стенду і забезпечує його актуальність у сучасному електроенергетичному секторі.

Завдяки цим характеристикам, стенд може використовуватися як в освітніх закладах для практичної підготовки студентів і майбутніх фахівців, так і в промислових дослідницьких лабораторіях для розробки, валідації та впровадження нових рішень у сфері релейного захисту. Доступність стенду порівняно з аналогами обладнання робить його привабливим для впровадження у багатьох вищих навчальних закладах, сприяючи підвищенню рівня знань та навичок електротехнічного персоналу і підтримці сталого розвитку енергетичної галузі.

Список використаної літератури

1. Research on the remote automatic test technology of the full link of the substation relay protection fault information system [Electronic resource] /

- Dongliang Nan [et al.] // Energy reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 1370–1380. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.130>.
2. Aibangbee J.O. Microprocessor-Based protective relays applications in nigerian power system protections [Electronic resource] / J. O. Aibangbee, S. O. Onohaebi // International journal of engineering trends and technology. – 2015. – Vol. 26, no. 2. – P. 88–94. – Mode of access: <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v26p216>.
3. НТЦ-10.66.1 "Системи релейного захисту та автоматики" | NTP Centr [Електронний ресурс] // NTP Centr. – Режим доступу: <https://ntpcentr.com/catalog/elektroenergetika/ntc-10-66-1-sistemy-relejnoj-zashchity-i-avtomatiki>.
4. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання]: навч. посіб. / О.С. Яндутьський, О.О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндутьського. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 102 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/16600/1/PZ.pdf>
5. NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVIS II Series) User Manual. [Electronic Resource]. – Access Mode <http://www.ni.com/pdf/manuals/374629c.pdf>.
6. Morris A. S. Use of LabVIEW in data acquisition and postprocessing of signals [Electronic resource] / Alan S. Morris, Reza Langari // Measurement and instrumentation. – [S. l.], 2021. – P. 243–274. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817141-7.00009-8>.
7. Conde Enríquez A. Virtual relay design and lab tests of an adaptive overcurrent relay [Electronic resource] / Arturo Conde Enríquez // Overcurrent relay advances for modern electricity networks. – [S. l.], 2023. – P. 329–367. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91777-3.00010-6>.
8. Рубаненко О. Особливості застосування діагностичного обладнання для релейного захисту РЕТОМ в лабораторному практикумі навчальної дисципліни «Основи релейного захисту та автоматики електричних систем» [Електронний ресурс] / О.С. Рубаненко, В.С. Мельник // Матеріали XLVIII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 13–15 берез. 2019 р., 2019. – С. 1–4. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2019/pa-per/view/7697>.
9. Virtual instrumentation based learning methodology for teaching power system measurement and protection [Electronic resource] / Ramón J. Betancourt [et al.] // Computer applications in engineering education. – 2019. – Vol. 27, no. 6. – P. 1555–1570. – Mode of access: <https://doi.org/10.1002/cae.22170>.
10. Novash I. V. Modeling of power systems and testing of relay protection devices in real and model time [Electronic resource] / I. V. Novash // ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. – 2017. – Vol. 60, no. 3. – P. 198–210. – Mode of access: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-198-210>.
11. Relay protection simulation and testing of online setting value modification based on RTDS [Electronic resource] / Zaixin Yang [et al.] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 4693–4699. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2963228>
12. Pinthurat W. Strategy for compensation of unbalanced powers in LV residential distribution networks using distributed single-phase battery systems [Electronic resource] / Watcharakorn Pinthurat, Branislav Hredzak // Electric power systems research. – 2022. – Vol. 211. – P. 108253. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108253>.
13. Large-scale hybrid real time simulation modeling and benchmark for nelson river multi-feed HVdc system [Electronic resource] / Chenghong Zhou [et al.] // Electric power systems research. – 2021. – Vol. 197. – P. 107294. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107294>.
14. Dommel H. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks [Electronic resource] / Hermann Dommel // IEEE transactions on power apparatus and systems. – 1969. – PAS-88, no. 4. – P. 388–399. – Mode of access: <https://doi.org/10.1109/tpas.1969.292459>.
15. Knowledge Base has all the answers - RTDS Technologies [Electronic resource] // RTDS Technologies. – Mode of access: <https://www.rtds.com/kb-has-all-the-answers/>.
16. Sidwall K. A review of recent best practices in the development of real-time power system simulators from a simulator manufacturer's perspective [Electronic resource] / Kati Sidwall, Paul Forsyth // Energies. – 2022. – Vol. 15, no. 3. – P. 1111. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/en15031111>.
17. C37.2-2022 – IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations (Revision of IEEE Std C37.2-2008). IEEE, 2022, pp.1–63, doi: 10.1109/IEEESTD.2022.9984140.
18. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М.

Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – Ч. 1. – 250 с.

References

- Nan, D., Tan, J., Zhang, L., Jingus, J., Wang, C. and Liu, W., (2022). Research on the remote automatic test technology of the full link of the substation relay protection fault information system. *Energy reports* [online]. 8, 1370–1380. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.130>.
- Aibangbee, J. O. and Onohaebi, S. O., (2015). Microprocessor-Based protective relays applications in Nigeria power system protections. *International journal of engineering trends and technology* [online]. 26(2), 88–94. Available at: <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v26p216>.
- STC-10.66.1 Protection relaying and automation systems [Systemy releinoho zakhystu ta avtomatyky]. *NTP Centr* [online]. Available at: <https://ntpcentr.com/catalog/elektroenergetika/ntc-10-66-1-sistemy-relej-noj-zashchity-i-avtomatiki/>.
- Yandulskyi, O. S. and Dmytrenko, O. O., (2016). Relay protection. Digital devices of relay protection, automation and control of electric power systems [Releinyi zakhyst. Tsyfrovi prystroi releinoho zakhystu, avtomatyky ta upravlinnia elektroenerhetychnykh system]: training. manual. – K.: NTUU "KPI", – 102 p. Available at: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/16600/1/PZ.pdf>.
- NI Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite II Series (NI ELVIS II Series) User Manual. [Electronic Resource]. Available at: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374629c.pdf>.
- Morris, A. S. and Langari, R., (2021). Use of LabVIEW in data acquisition and postprocessing of signals. *Measurement and instrumentation* [online], 243–274. Available at: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817141-7.00009-8>.
- Conde Enríquez, A., (2023). Virtual relay design and lab tests of an adaptive overcurrent relay. *Overcurrent relay advances for modern electricity networks* [online], 329–367. Available at: <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91777-3.00010-6>.
- Rubanenko, O. and Melnyk, V., (2019). Features of the use of diagnostic equipment for RETOM relay protection in the laboratory workshop of the educational discipline "Fundamentals of relay protection and automation of electrical systems". [Osoblyvosti zastosuvannya diahnostychnoho obladnannya dlia releinoho zakhystu RETOM v laboratornomu praktykumi navchalnoi dystsypliny «Osnovy releinoho zakhystu ta avtomatyky elektrychnykh system»]. *Materials of the XLVIII scientific and technical conference of VNTU subdivisions*, 13–15.03.2019, Vinnitsa, Ukraine [online], 1–4. Available at: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feem/all-feem-2019/paper/view/7697>.
- Betancourt, R. J., González-López, J. M., Espejo, E. B., Pérez-González, M. A., Laureano, E. V. and Ledesma, J. A., (2019). Virtual instrumentation based learning methodology for teaching power system measurement and protection. *Computer Applications in Engineering Education* [online]. 27(6), 1555–1570. Available at: <https://doi.org/10.1002/cae.22170>
- Novash, I. V., (2017). Modeling of power systems and testing of relay protection devices in real and model time. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations* [online]. 60(3), 198–210. Available at: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-198-210>.
- Yang, Z., Wang, Y., Xing, L., Yin, B. and Tao, J., (2020). Relay protection simulation and testing of online setting value modification based on RTDS. *IEEE Access* [online]. 8, 4693–4699. Available at: <https://doi.org/10.1109/access.2019.2963228>.
- Pinthurat, W. and Hredzak, B., (2022). Strategy for compensation of unbalanced powers in LV residential distribution networks using distributed single-phase battery systems. *Electric power systems research* [online]. 211, 108253. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108253>.
- Zhou, C., Fang, C., Kandic, M., Wang, P., Kent, K. and Menzies, D., (2021). Large-scale hybrid real time simulation modeling and benchmark for nelson river multi-infeed HVdc system. *Electric power systems research* [online]. 197, 107294. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107294>.
- Dommel, H., (1969). Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE transactions on power apparatus and systems* [online]. PAS-88(4), 388–399. Available at: <https://doi.org/10.1109/tpas.1969.292459>.
- Knowledge Base has all the answers - RTDS Technologies [online]. *RTDS Technologies*. Available at: <https://www.rtds.com/kb-has-all-the-answers>.
- Sidwall, K. and Forsyth, P., (2022). A review of recent best practices in the development of real-time power system simulators from a simulator manufacturer's perspective. *Energies* [online]. 15(3), 1111. Available at: <https://doi.org/10.3390/en15031111>.
- C37.2-2022, (2022). IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations (Revision of IEEE Std C37.2-2008). *IEEE*, pp.1–63, Available at: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9984140>.

18. Panchenko, S., Blyndiuk, V., Bazhenov V., Odhov M., and Semenenko Y. Protection Relaying and Automation [Releinyi Zakhyst i Avtomatyka: navch. posibnyk]: training. manual. – Kharkiv, UkrDUZT, 2020, 250 p. (In Ukrainian).

RESEARCH OF DIGITAL PROTECTION TERMINALS

V. P. Plis¹

¹Odessa Polytechnic National University

Abstract. Due to the development of technologies, the widely used electromechanical relays in the electric power industry have been replaced by multifunctional digital relay protection terminals. For the training of students and electrical personnel of enterprises, new approaches to the creation of experimental stands are needed, which will allow us to study the features of the use of digital protection and fully reveal their capabilities. The purpose of the work is to improve the quality of the knowledge and practical skills received by students in working with digital protection blocks. To achieve the goal, a specialized laboratory stand for testing digital security terminals has been developed. The stand consists of a mathematical model of the protected object and hardware, due to which the model mode parameters are converted into physical signals and fed in real time to a real digital device. The study of the protected element is provided in the characteristic modes of its operation close to real ones by providing a connection between the relay protection terminal and the information model. The equipment used at the stand does not require significant capital investments, and therefore this approach is available to most design and training organizations.

Keywords: digital protection terminal, experimental stand, analog-to-digital converter; digital-to-analog converter, mathematical model, induction motor.

Отримано 31.05.2023.



Пліс Валерій Павлович, Національний університет «Одеська політехніка», аспірант, старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту. Проспект Шевченко, 1, Одеса, Україна, електронна пошта: plis.v.p@op.edu.ua, тел. +380662076474

Valeriy Plis, Odessa Polytechnic National University, postgraduate, senior lecturer of the Department of the power supplying and energy management. Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, mail: plis.v.p@op.edu.ua, tel. +380662076474

ORCID ID: 0000-0002-0675-4407