

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Закалатов Кирило Миколайович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Реконструкція електричної частини підстанції 110/10 кВ з використанням
цифрових систем релейного захисту та автоматики**

(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Закалатов К.М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Савченко Л.Г.

(прізвище, ім'я, по батькові)

**к.і.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології**

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Закаталов К.М. Реконструкція електричної частини підстанції 110/10 кВ з використанням цифрових систем релейного захисту та автоматики. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Головне направлення роботи - створення технологічної, нормативної та виробничої бази з метою масового впровадження в енергетичну галузь інноваційного високопродуктивного продукту - необслуговуваних модульних самодіагностичних електричних підстанцій і станцій (цифрових підстанцій), включаючи використання централізованих, децентралізованих і гібридних принципів побудови систем захисту і автоматизації.

Ключові слова: електричні підстанції, систем захисту і автоматизації, цифрової підстанції

ABSTRACT

Zakatalov K.M. Reconstruction of the electrical part of the 110/10 kV substation using digital relay protection and automation systems. Qualification work for a master's degree in the specialty 141 – Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

The main direction is the creation of a technological, regulatory and production base for the purpose of mass introduction of an innovative high-performance product into the energy industry - maintenance-free modular self-diagnostic electrical substations and stations (digital substations), including the use of centralized, decentralized and hybrid principles of building protection and automation systems.

Keywords: electrical substations, protection and automation systems, digital substation

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ПОРІВНЯЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАДИЦІЙНИХ І ЦИФРОВИХ ПІДСТАНЦІЙ	6
1.1 Аналіз різних проектних рішень побудування цифрових підстанцій	6
1.2 Пропозиції щодо впровадження ЦПС	10
1.3 Вибір силових трансформаторів цифрової підстанції	14
1.4 Досвід реалізації ЦПС	18
Висновок по розділу	20
2. ІННОВАЦІЇ В ОБЛАСТІ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ	21
2.1 Опис традиційних систем релейного захисту	23
2.2 Системи адаптивного релейного захисту	26
Висновок по розділу	27
3. ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ У СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ	28
3.1 Принципи роботи ШІ та МН у релейному захисті.	28
3.2 Розробка та застосування цифрових релейних захисників	29
3.3 Використання IoT та інтелектуальних датчиків у релейному захисті та автоматичі	31
Висновки по розділу	32
4. ПРИСТРОЇ ТА БЛОКИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ДЛЯ ЦИФРОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ	34
Висновки по розділу	36
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Тема розробки та впровадження цифрових електричних підстанцій та станцій стає все більш актуальною в умовах стрімкого розвитку технологій та зміни потреб енергетичного сектору. Цифровізація енергетичних об'єктів передбачає використання сучасних інформаційних та комунікаційних технологій, що дозволяє значно підвищити ефективність, надійність та безпеку роботи енергетичної інфраструктури.

Основна перевага цифрових підстанцій полягає в їхній здатності забезпечувати реальний моніторинг та управління процесами в режимі онлайн. Це не лише дозволяє оперативно виявляти та усувати неполадки, але й оптимізувати енергопостачання, мінімізуючи втрати та скорочуючи витрати. В умовах глобальних змін клімату та переходу до відновлювальних джерел енергії впровадження цифрових технологій стає необхідним для інтеграції різних систем та підвищення гнучкості управління енергосистемами.

Крім того, перехід до цифрових підстанцій відповідає вимогам сучасного законодавства та стандартів у сфері енергетичної безпеки. Актуальність цього напрямку підкреслює й зростаюча конкуренція на ринку енергетичних послуг, де компанії, що використовують передові технології, отримують конкурентні переваги.

Таким чином, розробка та впровадження цифрових електричних підстанцій та станцій є ключовими аспектами сучасного розвитку енергетичної галузі. Ці інновації не лише сприяють підвищенню ефективності та надійності енергопостачання, але й відіграють важливу роль у забезпеченні сталого розвитку економіки та суспільства в цілому.

Основною метою даної роботи є розробка та впровадження цифрових електричних підстанцій і РЗА, що стає актуальним в умовах зростаючих вимог до надійності та якості електропостачання.

Об'єктом дослідження є процес розробки та впровадження цифрових рішень, здатних значно покращити функціонування інфраструктури електропостачання.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

- 1. Закаталов К. М ДІАГНОСТИКА ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЗА ДОПОМОГОЮ РАДІОПЕРЕШКОД** 231-232 с. МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКОВО-ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ НАУКОВО- ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ, ДОКТОРАНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ФАКУЛЬТЕТУ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року м. Житомир
- 2. Кашапов Б. О., Закаталов К. М. ВИБІР МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ ОЖЕЛЕДИЦІ** 225-227 с. МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКОВО-ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ НАУКОВО- ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ, ДОКТОРАНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ФАКУЛЬТЕТУ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року м. Житомир
- 3. Закаталов К. М., Драко Н. О. ВТРАТИ ПОТУЖНОСТІ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ КОРОННИЙ РОЗРЯД** 224-225 с. МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКОВО-ІННОВАЦІЙНИЙ ІНСТИТУТ ІНЖЕНЕРІЇ АГРОПРОМИСЛОВОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ МАТЕРІАЛИ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ НАУКОВО- ПЕДАГОГІЧНИХ ПРАЦІВНИКІВ, ДОКТОРАНТІВ, АСПІРАНТІВ ТА ЗДОБУВАЧІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ФАКУЛЬТЕТУ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ЕНЕРГЕТИКИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» 31 жовтня 2024 року м. Житомир

1. ПОРІВНЯЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАДИЦІЙНИХ І ЦИФРОВИХ ПІДСТАНЦІЙ

1.1 Аналіз різних проектних рішень побудування цифрових підстанцій

В останні роки при створенні та технічному переозброєнні енергетичних об'єктів все більш актуальним стає створення цифрових підстанцій (ЦПС), що включають пристрої, що відповідають протоколам стандарту IEC 61850 (МЭК 61850). Сьогодні у світі підходи до необхідності та доцільності створення цифрових підстанцій різні. В енергетичних євротехнологіях нині ЦПС активно не використовуються, а значний інтерес проявляється до застосування відновлюваних джерел енергії. В азіатських країнах вже побудовано десятки таких установок [1].

Недостатня автоматизація технологічного процесу на підстанції (ПС), і навіть збільшення вразливості її об'єктів призводять до погіршення надійності функціонування підстанції. Щоб підвищити надійність та ефективність діючих підстанцій, необхідно запровадити необхідний обсяг нового обладнання. При впровадженні нових технологій, крім загальної специфіки та особливостей енергетичних об'єктів, необхідно також враховувати, що застосування їх має виправдатися не тільки в технічному, але в економічному плані. Перш ніж застосовувати інтелектуальні технології, необхідно попередньо тестувати компоненти ЦПС, провести технічні та економічні аналізи ефективності їх впровадження, розробити інформаційні та керуючі підстанції з використанням найбільш відповідних обладнання та програмного забезпечення [2].

Експерти автоматичних систем по-різному дають визначення ЦПС. **Цифрові підстанції** - установки з дуже високим рівнем автоматизації, де обладнання орієнтоване на цифрову передачу даних, а інформаційні системи управляються та взаємодіють у режимі реального часу та експлуатуються без постійної присутності персоналу.

Згідно з проектними нормами підстанцій, ЦПС – це вдосконалені автоматизовані системи контролю та управління енергоустановками з використанням інноваційних цифрових пристроїв для збору та обробки інформації, швидкісний обмін даними в яких відбувається відповідно до протоколів стандартів MEK 618050 [3]. Використовувати цифрові вимірювальні прилади замість аналогових вимірювальних трансформаторів, визначає не тільки порядок передачі та обміну інформацією між окремими пристроями, а й конфігурацію схем ПС, приладів та обладнання, дозволяючи скоротити їх кількість та компактно розташувати (Рис.1,2) Суворе дотримання стандарту MEK 61850 в Україні при створенні нового технологічного обладнання підстанцій дозволить надалі спростити обслуговування ЦПС та модернізувати їх [4].

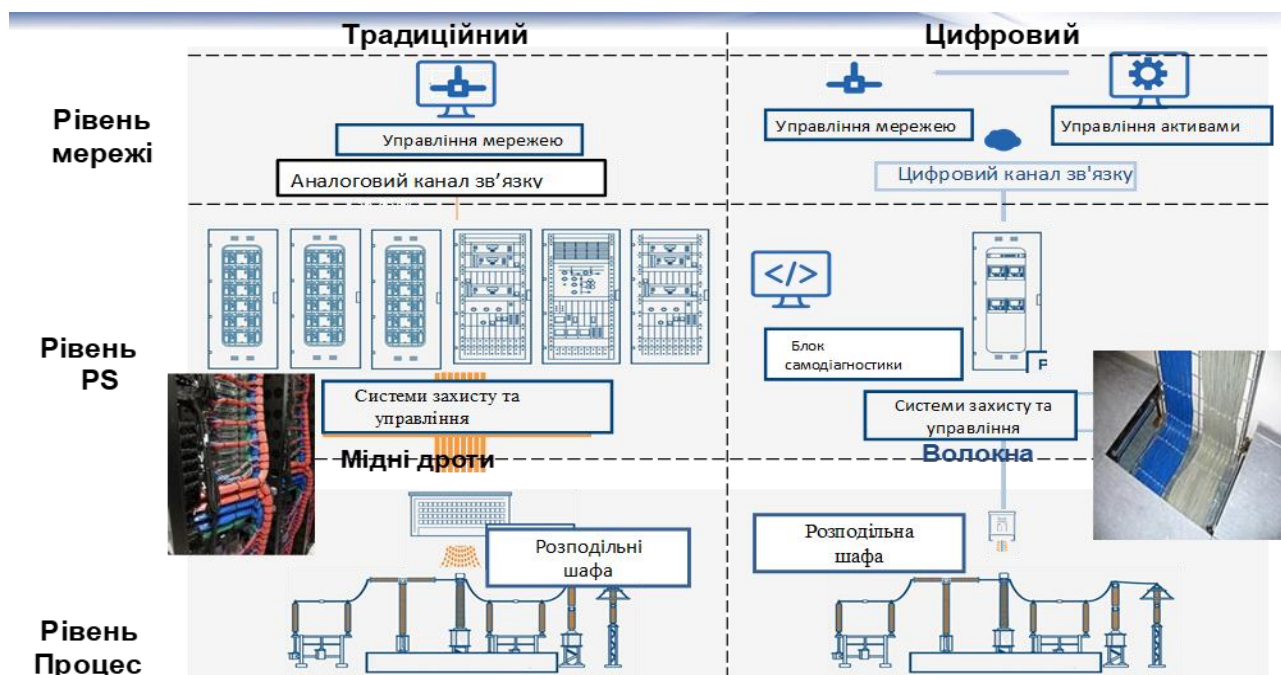


Рисунок 1. Порівняльна модель традиційних і цифрових підстанцій

Основними етапами розвитку підстанцій від класичної до автоматизованої ЦПС є:

- встановлення цифрових оптичних трансформаторів напруги (ТН) та струму (ТТ);
- оптимізація мікропроцесорних систем;

- оцифрування потоків інформації;
- віддалений моніторинг, керування та відеоспостереження з диспетчерського центру.

Для надійного та точного функціонування цифрових підстанцій необхідно використовувати сучасні пристрої на основі останніх розробок оптичного, електронного та цифрового обладнання. Компактні та легкі цифрові електронні вимірювальні трансформатори напруги та струму з підвищеною безпекою, точністю та швидкодією призначені для вимірювання та передачі параметрів напруги та струму пристроям захисту, автоматики, сигналізації та керування.

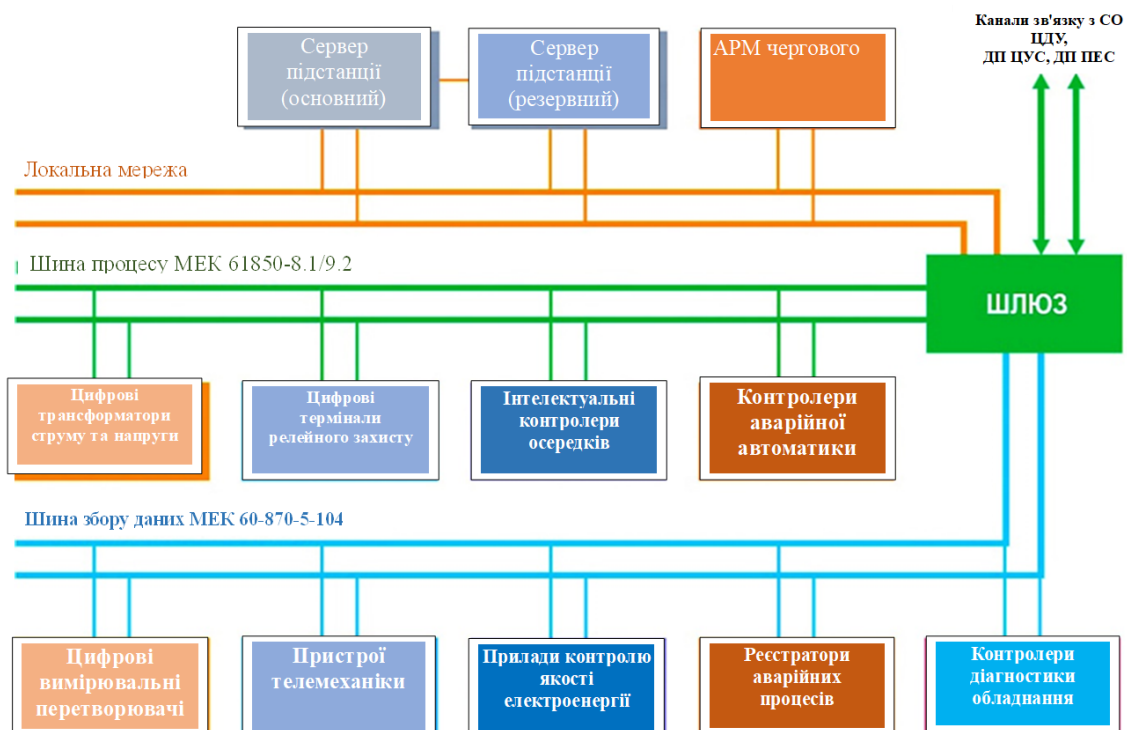


Рисунок 2. Структура цифрової підстанції

Для того, щоб забезпечити необхідний рівень надійності пілотних проєктів, потрібне додаткове тестування засобів проєктування, конфігурації пристроїв на підстанціях та обленерго в цілому, цифрових систем, призначених для різних виробників мікропроцесорних пристроїв [2].

Технологія «цифрової підстанції» може бути поділена на дві частини:

1. Збір інформації про стан обладнання її та передачу в режимі реального часу на автоматизоване робоче місце оперативного персоналу;

2. Автоматизація технологічних процесів та обмін даними за стандартом MEK 61850.

Для здійснення першої частини проекту «цифрова підстанція» технічним рішенням є системи діагностування та контролю обладнання, які необхідні для того, щоб оцінити залишковий ресурс обладнання, виявити дефекти техніки, що перевіряється на початкових етапах, запобігти відмовим і аварійним ситуаціям, прогнозувати розвиток технічного стану контрольованого обладнання. На основі контрольованих параметрів здійснюється оцінка технічного стану обладнання та автоматично переводиться системою моніторингу на диспетчерський щит за допомогою світлодіодних сигналів різного кольору: контрольовані параметри досягли критичних значень – червоний сигнал. Якщо пристрій перебуває в несправному стані при перевищенні допустимих значень одного або декількох параметрів, система подає сигнал жовтого кольору, а при знаходженні всіх параметрів у нормі система контролю сигналізує зеленим світлодіодним сигналом.

В даний час реалізувати другу частину технології ЦПС неможливо через кілька причин. Насамперед, поки відсутнє програмне забезпечення для автоматичного управління обладнанням підстанції, по-друге, нині цифрові підстанції в нашій країні не використовуються достатньо через високі ціни на обладнання та недостатню кваліфікацію персоналу. У той же час переваги, які мають ЦПС, дозволять у майбутньому перейти від традиційних методів захисту енергетичних об'єктів до інноваційних. У процесі модернізації необхідно відмовитися від звичних аналогових вимірювальних приладів на користь сучасних цифрових. Надалі цей процес стане не тільки простіше, але ще й вигіднішим [5].

Після проведення досліджень та аналізу різних проектних рішень були виділені переваги та недоліки впровадження нових інтелектуальних технологій. Побудова цифрової підстанції дозволить отримати низку переваг:

- суттєве зниження кількості кабельних з'єднань та можливість проведення повної їхньої діагностики, що дозволить прискорити пошук пошкоджень та скоротити час відновлювальних робіт;
- підвищення точності вимірів;
- єдина форма протоколів обміну інформацією (МЕК 61850);
- значне зменшення загальної кількості та номенклатури обладнання за рахунок використання комунікаційних та обчислювальних серверів загального призначення, що мають нижчу вартість та більш високу продуктивність, ніж спеціальні, що скоротить обсяг та час профілактики та відновлення працездатності обладнання;
- спрощення проектування, експлуатації та обслуговування (періодичних перевірок пристроїв, зниження їх обсягів та частоти за рахунок оптимізації профілактичних та необхідних відновлювальних робіт);
- перехід на необслуговувані підстанції за рахунок забезпечення спостереження каналів для збору та передачі даних, управління та контролю;
- пожежо- та вибухобезпеки та екологічності.

Таким чином, спостерігається і технологічний ефект, пов'язаний із переходом на безперервний моніторинг всього обладнання, що підвищує надійність та довговічність тягової підстанції, а також сприяє стратегії енергозбереження [6].

1.2 Пропозиції щодо впровадження ЦПС

Порівнюючи техніко-економічні показники ЦПС та основні витрати на реалізацію традиційних рішень та інноваційних рішень, можна зробити висновок, що при масовому виробництві цифрових підстанцій вартість нового рішення не перевищить вартість традиційного рішення побудови систем автоматизації ЦПС. Промислове впровадження ЦПС з відкритими розподільчими пристроями високого рівня напруги очікує зниження витрат на 23,6% порівняно з традиційними системами автоматизації, і на 7,6% – на

підстанціях, оснащених сучасними розподільчими пристроями з ізоляцією елегазової.

Функціональні можливості пристроїв для ЦПС розглядаються для реалізації цифровізації підстанцій (ТПС) на основі стандартів МЕК 61850, як перспективні способи вирішення численних проблем роботи електромереж різного призначення[3]. Наприклад, визначення місця пошкодження електричної мережі більш точно і швидко може бути зроблено на ЦПС. Існуючі сьогодні способи та методи виявлення місця пошкодження в контактній мережі мають ряд недоліків, що знижують точність та збільшують час пошуку. Новий метод захисту мережі, який використовується на підстанціях з високим рівнем цифровізації, дозволить точно знайти місце пошкодження та скоротити час його визначення завдяки швидкості реакцій елементів автоматичної системи моніторингу цифрової підстанції.

Застаріле аналогове обладнання ПС не дозволяє перейти до автоматизації технологічних процесів за стандартом МЕК 61850. Для вирішення цих проблем необхідно поетапно перевести підстанції спочатку на цифрові підстанції нового покоління, а потім на інтелектуальні. Завдяки впровадженню ЦПС, а надалі і інтелектуальних підстанцій (ІПС), можна усунути ряд недоліків класичних ПС, головними з яких є: неможливість дистанційного автоматичного управління, моніторингу, діагностики пошкодження обладнання, помилки оперативного персоналу, використання аналогового обладнання, що не відповідає стандартам МЕК- 61850. Щоб здійснити перший етап перекладу ПС на новий ступінь, необхідні інтелектуальні, високонадійні цифрові пристрої, які водночас прості в обслуговуванні у зв'язку із зменшенням кількості кабелів та заміною їх на оптоволоконні лінії зв'язку. Незважаючи на всі переваги, для переведення підстанції в цифровий формат потрібні не тільки великі фінансові витрати, але також сумісність з обладнанням, яке вже встановлено на ПС [7].

В Україні введення ЦПС можливо у повному обсязі під час вирішення наступних питань:

- відповідність стандартам міжнародного рівня та розробка вітчизняного нормативного забезпечення впровадження нових ЦПС;
- метрологічна атестація систем автоматизації, за допомогою МЕК 61850;
- підготовка оперативного та ремонтного персоналу, створення центрів компетенції;
- ремонтпридатність та взаємозамінність компонентів ЦПС;
- мінімізація ризиків кібербезпеки під час перекладу ЦПС на автоматизоване телеуправління;
- застосування вітчизняних рішень, як і програмної, і у апаратної частини ЦПС.

На другому етапі розвитку підстанцій при перекладі ЦПС на інтелектуальний рівень передбачається дистанційне управління та обмін даними між установками, віддалене повністю автоматичне спостереження за технічним станом обладнання та всіма технологічними процесами ПС у режимі реального часу. За результатами такого моніторингу штучний інтелект ПС самостійно без участі обслуговуючого персоналу може дистанційно управляти ПС, як приймати рішення, а й автоматично їх здійснювати. При цьому зменшиться аварійність обладнання та ймовірність його відмов, скоротяться непланові простої обладнання через технічні несправності та ін.

Для здійснення переходу на ПС на діючих підстанціях можуть бути використані інтелектуальні технології, такі як системи діагностики та моніторингу (СДМ), що виробляють вимірювання, передачу та відображення параметрів силових трансформаторів у різних режимах їх роботи, що визначають залишковий ресурс трансформаторів, прогножуючи їх подальшу експлуатацію.

Для реалізації СДМ підходить, наприклад, система контролю, інвентаризації, технічного супроводу (СКІТ С1), за допомогою якої можна дистанційно контролювати стан трансформатора та його вводи [7].

Автоматична система діагностики стану вологості ізоляції, яка за потреби може без участі оперативного персоналу на підстанції проводити осушення ізоляції трансформатора віддалено без його відключення. Для підвищення

надійності та безперебійності електропостачання споживачів на інтелектуальній підстанції повинні використовуватися спеціальні інноваційні пристрої для керування комутаційними апаратами розподільчих пристроїв, а також відстеження диспетчером за станом у режимі online. На ІПС необхідно застосовувати сучасний централізований релейний захист та автоматики (ЦРЗА) підстанції, головна особливість якої полягає у передачі інформації у вигляді векторів замість передачі масиву миттєвих значень через комунікаційну мережу підстанції.

Порівняльний аналіз класичної, цифрової та інтелектуальної підстанцій, де розглянуто їх переваги, недоліки та характерні особливості наведено в Табл. 1.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз підстанцій

Тип підстанції	Характеристики підстанції	
	<i>Переваги</i>	<i>Недоліки</i>
Класична підстанція	<ol style="list-style-type: none"> 1. Вивчена технологія; 2. Не вимагає нових знань від розробників та персоналу. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Неможливість; дистанційного керування 2. Висока ймовірність аварій через помилкові дії персоналу; 3. Велика кількість кабелів; 4. Необхідність постійного спостереження та огляду, у тому числі з відключенням обладнання для діагностики; 5. Часті помилкові спрацьовування релейного захисту.
Цифрова підстанція	<ol style="list-style-type: none"> 1. Керована; 2. Можливість збору даних на головному комп'ютері про всю підстанцію; 3. Немає ризику неправильних перемикачів та помилок персоналу. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Можливі кібератаки; 2. Скорочення робочих місць; 3. Вимагає нових знань від розробників та персоналу; 4. Висока ціна.

Тип підстанції	Характеристики підстанції	
	<i>Переваги</i>	<i>Недоліки</i>
Інтелектуальна підстанція	<ol style="list-style-type: none"> 1. Повністю керується; дистанційно за допомогою штучного інтелекту; 2. Автоматичне спостереження за технічним станом обладнання онлайн на віддаленому сервері; 3. Управління комутаційними апаратами з віддаленого комп'ютера; 4. Ризик помилок персоналу, відсутня чи різко знижується ймовірність помилкових відмов та спрацьовувань РЗА; 5. Захищена від кібератак. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Скорочення робочих місць; 2. Вимагає нових знань від розробників та персоналу; 3. Висока ціна.

1.3 Вибір силових трансформаторів цифрової підстанції

В умовах стрімкого розвитку енергетичної галузі та впровадження цифрових технологій, вибір силових трансформаторів для цифрових підстанцій стає ключовим аспектом, що визначає ефективність і надійність всього електромережевого комплексу. Силкові трансформатори відіграють центральну роль у процесі перетворення та розподілу електроенергії, забезпечуючи необхідну ступінь перетворення напруги та підтримуючи стабільну роботу системи.

Таким чином, вибір силових трансформаторів для цифрових підстанцій є багатогранним завданням, що вимагає врахування різних факторів: від технічних характеристик до екологічних аспектів. Правильний вибір дозволяє суттєво підвищити ефективність роботи підстанцій, знизити експлуатаційні ризики та забезпечити надійне енергопостачання в сучасних умовах.

Розрахунок силових агрегатів та приладів для цифрових підстанцій визначаються аналогічно, як і в традиційних підстанціях. Як приклад, виберемо силові трансформатори для цифрової підстанції

Якщо, $\cos\varphi$ однаковий для всіх споживачів, то сумарну повну потужність можна розрахувати через сумарну активну потужність споживачів:

$$S_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{\cos\varphi}$$

У таблиці 2 представлені значення загальної навантаження і визначаємо споживану електроенергію на підстанції:

$$W_{\text{пс}} = \sum_{i=0}^n P_{in}(t) \cdot t_{in} = 161970 \text{ MBm}\cdot\text{г}$$

Таблиця 2. - Сумарна навантаження на цифровій підстанції

Ступінь	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T, г	500	500	500	500	1000	1000	1000	500	500	500	500	1760
P, МВт	24	23	22	21	19	17	15,5	14,5	14	13	12	11
S, МВА	26,6	25,5	24,4	23,3	21,1	18,8	17,2	16,1	15,5	14,4	13,3	12,2

Тоді тривалість річного навантаження:

$$T_M = \frac{W_{\text{пс}}}{24} = 6749 \text{ г}$$

Обрання потужності трансформаторів

Для вибору потужності трансформаторів слід визначити номінальну потужність [12]:

$$S_{\text{T.ном}} \geq \frac{S_{\text{max.пс}}}{k_{\text{пер}} \cdot (n-1)} k_{1-2} = 15.2 \text{ МВА}$$

Далі обираємо два трансформатора великої по потужності. Дані обраних трансформаторів представлені в таблиці 3.

Таблиця 3.- Дані обраних трансформаторів

Найменування	S_H , кВА	Втрати, кВт		U_x , %	I_x , %
		XX	КЗ		
ТРДН25000/110/10	25000	19	120	30	0,23
ТРДН40000/110/10	40000	22	170	10,5	0,28

Обрання номінальної потужності трансформаторів

Визначимо напругу короткого замикання на обмотках трансформатора ТРДН-25000/110/10 :

$$U_{к.в} = 0,125 \cdot U_k = 3,75\%$$

$$U_{к.н} = U_{к.н2} = 1,75 \cdot U_k = 52.5\%$$

Втрата активної потужності КЗ відповідних обмоток ТРДН-25000/110/10:

$$P_{к.в} = 0$$

$$P_{к.н1} = U \cdot P_{к.н2} = 2\Delta P_{кз} = 240\text{квт}$$

Втрата реактивної потужності обмоток трансформатора в режимі КЗ ТРДН-25000/110/10:

$$Q_{к.в} = \frac{U_{к.в}}{100} \cdot S_H = 937,5\text{квар}$$

$$Q_{к.н1} = Q_{к.н2} = \frac{U_{к.н}}{100} \cdot S_H = 13130\text{квар}$$

Тоді втрати активної потужності короткого замикання відповідних обмоток ТРДН-25000/110/10:

$$P_{к.в}^I = P_{к.в} + K_{II} \cdot Q_{к.в} = 46,875\text{кВт}$$

$$P_{к.н1}^I = P_{к.н2}^I + K_{II} \cdot Q_{к.н} = 896,25\text{ кВт}$$

Знайдемо коефіцієнти завантаження силового трансформатора ТРДН-25000/110/10:

$$k_{3.В} = \frac{S_{ВН}}{S_H} = 1,156$$

$$k_{3.В} = \frac{S_{НН1}}{S_H} = 0,4$$

$$k_{3.Н2} = \frac{S_{НН2}}{S_H} = 0,756$$

Втрата реактивною потужності холостого ходу ТРДН-25000/110/10:

$$Q_x = \frac{I_x}{100} \cdot S_H = 5,5 \text{ квар}$$

Тоді втрати активною потужності трансформатора в режимі холостого ходу ТРДН-25000/110/10:

$$P_x^I = \Delta P_x + K_{\text{ІП}} \cdot Q_x = 21,875 \text{ кВт}$$

Наведені втрати потужності ТРДН-25000/110/10:

$$P_T^I = P_x^I + k_{3.В}^2 \cdot P_{к.В}^I + k_{3.Н1}^2 \cdot P_{к.Н1}^I + k_{3.Н2}^2 \cdot P_{к.Н2}^I = 739,511 \text{ кВт},$$

Знайдемо, скільки складає економічна навантаження трансформаторів ТРДН-25000/110/10

$$S_{e.пс} = S_H \cdot \sqrt{n \cdot (n - 1) \cdot \frac{P_x^I}{P_k^I}} = 5524 \text{ кВА}$$

На всіх щаблях повна потужність навантаження перевищує економічне навантаження трансформатора тому використовуємо обидва трансформатори на всіх щаблях.

Економічна доцільність вибору трансформатора ТРДН- 25000/110/10:

$$S_{пр} = E_H \cdot K + B = 195515,51 \text{ грн}$$

1.4 Досвід реалізації ЦПС

В даний час у світі вже реалізовано чимало проектів на основі стандарту MEK 61850, які показали переваги інтелектуальних технологій при впровадженні ЦПС. В останні кілька років світова електротехнічна громадськість постійно обговорює плюси та мінуси технології цифрової підстанції. Але якщо азіатські країни активно переводять свої енергетичні об'єкти на нову технологію, то в Україні та країнах Європи реалізовано лише кілька пілотних проектів у цьому напрямі.

GE, світовий лідер промисловості та цифрових технологій, поставив в Україну першу цифрову підстанцію для Приморської вітроелектростанції у Запорізькій області.

"GE уклала з компанією ДТЕК, енергетичним підрозділом найбільшої бізнес-групи України System Capital Management, угоду на постачання високовольтного обладнання для центрального розподільчого пункту на 150 кВ та двох підстанцій 150/35/10 кВ. Устаткування забезпечить видачу в мережу електроенергії від першої черги Приморської вітроелектростанції (ВЕС) потужністю 100 МВт у Запорізькій області, яка була введена в експлуатацію у 2019 році", - повідомили у прес-службі ДПЕК.

Зазначається, що на Приморській ВЕС буде використано інноваційну технологію "цифрова підстанція" (ЦПС). Це перший проект із застосуванням ЦПС в Україні, наголосили в ДТЕК.

Цифрова підстанція дозволяє оцінити стан обладнання в режимі реального часу та автоматичного реагування на пошкодження та збої. Це полегшує технічне обслуговування підстанції, здійснюючи його за станом, а не в плановому режимі.

Технологія "цифрова підстанція" - основа "розумних мереж" - полягає в обміні даними повністю цифровому вигляді на основі єдиного стандартного протоколу MEK 61850. На відміну від звичайної підстанції, що використовує обмін електричними аналоговими/дискретними сигналами, ЦПС поєднує режим "цифрової" взаємодії обладнання з високою надійністю та доступністю системи.

Основним комутаційним обладнанням GE для Приморської ВЕС будуть модулі HURact - компактний гібридний розподільний пристрій з елегазовою ізоляцією.

Герхард Сейрлінг, генеральний директор підрозділу GE Grid Solutions у Європі та СНД, зазначив: "GE пишається можливістю підтримати цифрову трансформацію енергетичної інфраструктури України. Активне включення ключових елементів "розумних мереж" дозволить енергосистемі країни перейти на новий рівень надійності та економічної ефективності на користь українських споживачів".

"Приморська ВЕС стане майданчиком для реалізації цифрових технологій в енергетиці та взірцем для подальшого проектування вітроелектростанцій України", - прокоментував директор ВЕС Юрій Жабський.

Для першої черги Приморської вітроелектростанції GE Renewable Energy поставила 26 вітрогенераторів загальною потужністю 100 МВт, а також займатиметься їх подальшим обслуговуванням. Додаймо, що GE має більше ніж 20-річний досвід у сфері розробки та реалізації проектів з автоматизації енергетичних підстанцій[8].

Аналіз зарубіжного досвіду використання та проектування цифрових підстанцій виявив успішну реконструкцію об'єктів електроенергетики з погляду покращення техніко-економічних показників та використання передових технологій. Так, наприклад, у Франції з 2016 р. експлуатується цифрова підстанція «Блоко», під час реконструкції якої встановлено оптичні трансформатори струму, нові трансформатори напруги, зменшилася кількість кабельних зв'язків за рахунок застосування оптичних мереж. Було приділено велику увагу резервуванню обладнання у складі релейного захисту та автоматики, що дозволило суттєво збільшити надійність РЗА. Планується, що до 2030 року всі підстанції Франції будуть оцифровані.

Першим великим пілотним проектом на основі стандарту MEK 61850 стало введення в експлуатацію у 2008 році. цифрової підстанції *TVA Bradley* у США. Впровадження ЦПС дозволило покращити сумісність між пристроями різних

виробників, підвищити кваліфікацію персоналу в частині стандарту МЕК 61850, а також виявити проблеми, що виникають під час його використання.

У 2009 р. на підстанції *Alcala de Henares* в Іспанії проведено експериментальне впровадження шини процесу в частині передачі дискретної інформації.

На ЦПС *Osboldwick* у Великій Британії проводилися експерименти, мета яких полягала в порівнянні тимчасових характеристик мікропроцесорного релейного захисту (МПРЗА) на базі традиційних та цифрових трансформаторів струму за допомогою пристроїв, що передають інформацію про миттєві значення струмів і напруги за протоколом МЕК 61850.

Великий розвиток цифрові підстанції отримали у Китаї. 2006 р. була введена в експлуатацію перша цифрова підстанція *Qijing, Yunnan*. До 2009 року Китай зайняв лідируючу позицію у світі з впровадження цифрових підстанцій, вводячи щороку в експлуатацію кілька десятків таких ПС [9].

ВИСНОВОК ПО РОЗДІЛУ 1

Поступовий поетапний перехід з класичної ПС до ЦПС, а далі – від ЦПС до ІПС різко підвищить надійність, рівень керованості обладнанням підстанцій, дасть можливість подальшого розвитку повного дистанційного моніторингу, діагностики та обслуговування ПС, виключити ризик неправильних перемикань, оскільки в системі програмного забезпечення диспетчера можна запрограмувати дії, які не можуть бути виконані в процесі обслуговування ІПС. Впровадження ІПС та розвиток інтелектуальних технологій у майбутньому неминуче призведе до переведення персоналу на новий рівень логіки управління інноваційними технологіями, що дозволить зробити ризики виникнення аварій на підстанціях мінімальними, а відтак підвищити надійність всього енергетичного комплексу.

2. ІННОВАЦІЇ В ОБЛАСТІ РЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ

В сучасній енергетичній індустрії релейний захист і автоматика (РЗА) відіграють критично важливу роль у забезпеченні надійності, безпеки та ефективності роботи електроенергетичних систем. автоматичного вимкнення або коригування його роботи у разі виявлення пошкодження чи аномалій, які можуть призвести до аварій чи збоїв.

Сучасний стан релейного захисту та автоматики характеризується інтенсивним впровадженням цифрових технологій, що зумовлює перехід від традиційних електромеханічних та статичних пристроїв до більш складних та функціональних цифрових систем. Це дозволяє підвищити точність та швидкість реакції систем РЗА, а також розширити можливості інтеграції з іншими системами управління та моніторингу енергетичної інфраструктури.

Значимість релейного захисту та автоматики у сучасних енергетичних системах важко переоцінити. Вони не тільки сприяють запобіганню великих технологічних порушень та аварій, але й забезпечують оптимізацію розподілу та використання електричної енергії, підвищення ефективності електроенергетичних систем та мінімізацію втрат. Крім того, сучасні системи РЗА важливі для інтеграції відновлюваних джерел енергії та забезпечення стійкого функціонування розподілених енергетичних ресурсів, що стає особливо актуальним у контексті глобальної енергетичної трансформації та прагнення до зниження впливу на навколишнє середовище.

Таким чином, релейний захист та автоматика є ключовими елементами у стратегії підвищення стійкості та ефективності енергетичних систем на сучасному етапі їх розвитку.

Актуальність цього дослідження обґрунтовується такими факторами:

1. Технологічний прогрес: Нові технології, такі як цифрова автоматизація та штучний інтелект, пропонують значні можливості для підвищення ефективності РЗА, вимагаючи ретельного аналізу впливу на надійність систем.

2. Інтеграція відновлюваних джерел енергії: Зростання кількості джерел розподіленої генерації потребує адаптації систем РЗА до нових умов роботи мереж.
3. Підвищення вимог до безпеки: Посилення норм безпеки та екологічних стандартів робить необхідним перегляд існуючих підходів до релейного захисту та автоматики.
4. Таким чином, метою даного дослідження є аналіз сучасного стану та потенціалу розвитку релейного захисту та автоматики у контексті поточних та майбутніх викликів енергетичної галузі.

Роботи які ілюструють останні досягнення та інновації в галузі релейного захисту та автоматики:

1. Дослідження функціональності цифрових релейних захистів. Стаття «Впровадження та тестування цифрового реле для захисту енергосистеми» була опублікована в IEEE Transactions on Power Delivery у 2019 році. Дослідження зосереджено на розробці, впровадженні та випробуванні нових цифрових релейних пристроїв, призначених для підвищення ефективності та надійності захисту у сучасних енергетичних системах[10].
2. Застосування машинного навчання для оптимізації РЗА. Стаття "Machine Learning Models for Electrical Fault Detection in Power Networks", опублікована в журналі Energy Systems у 2020 році. У цьому дослідженні аналізується, як застосування машинного навчання може покращити точність та швидкість виявлення електричних несправностей, прискорюючи реакцію на потенційні збої в енергетичних мережах[11].
3. Адаптація систем РЗА до інтеграції поновлюваних джерел енергії. Стаття "Challenges and Solutions for Relay Protection in Renewable Energy Integrated Power Systems", опублікована у журналі Renewable Energy у 2021 році. Тут розглядаються специфічні труднощі, що виникають при інтеграції відновлюваних джерел енергії в традиційні

енергетичні мережі, та пропонуються новаторські підходи для адаптації релейного захисту до цих умов[12].

4. Поліпшення кібербезпеки для систем РЗА. Стаття "Cybersecurity for Digital Substation Automation Systems", опублікована в IEEE Access в 2022 році.

Ці дослідження демонструють поточні тенденції та наукові досягнення в галузі релейного захисту та автоматики, наголошуючи на активному впровадженні нових технологій та підходів для підвищення безпеки та ефективності енергетичних систем.

2.1 Опис традиційних систем релейного захисту

Традиційні системи релейного захисту є базовими елементами електричних мереж, виконують функції моніторингу та захисту від різних аварійних ситуацій. Ці системи відігравали ключову роль у розвитку та становленні електроенергетичної галузі, забезпечуючи надійність та безпеку роботи енергетичних систем.

Електромеханічні реле. Електромеханічні реле були першими пристроями, що застосовуються в системах релейного захисту, та залишалися основним типом реле до середини ХХ століття. Принцип їх роботи заснований на електромеханічних взаємодіях між струмом, що проходить через котушку, та механічними елементами, такими як якорі та контакти.

Основні компоненти електромеханічних реле:

Котушка: намотування дроту, через яку проходить електричний струм, створюючи магнітне поле.

Якір: рухомий елемент, що переміщається під дією магнітного поля котушки.

Контакти: механічні елементи, що замикаються або розмикаються залежно від положення якоря.

Електромеханічні реле мають такі характеристики:

- Простота конструкції: Дані пристрої відрізнялися простотою конструкції, що забезпечувало їх високу надійність і тривалий термін служби.
- Обмежена швидкість спрацьовування: через наявність механічних частин, що рухаються, швидкість їх спрацьовування була відносно невисокою.
- Низька вибірковість і точність: можливості точного настроювання параметрів захисту були обмежені, що знижувало їх ефективність у складних мережах[13].

Статичні реле. У другій половині ХХ століття почалося використання статичних реле, які використовували напівпровідникові компоненти замість механічних частин. Це дозволило значно покращити характеристики релейного захисту.

Основні компоненти статичних реле:

- Напівпровідникові елементи: транзистори, діоди та операційні підсилювачі, які замінили механічні контакти.
- Аналогові схеми: використовувалися для обробки сигналів та виконання логічних функцій захисту.

Переваги статичних реле включають:

- Збільшена швидкість спрацьовування: відсутність механічних елементів дозволило значно скоротити час реакції аварійні ситуації.
- Підвищена точність та стабільність: напівпровідникові елементи забезпечували більш точну та стабільну роботу.
- Розширені функціональні можливості: статичні реле могли виконувати складніші завдання, такі як диференціальний захист та захист від несиметрії струмів[14].

Гібридні системи релейного захисту. На етапі переходу від статичних до цифрових реле були розроблені гібридні системи, що поєднують переваги обох типів. Ці системи використовували комбінацію напівпровідникових компонентів та найпростіших цифрових елементів для покращення характеристик захисту.

Основні характеристики гібридних систем:

- Поєднання аналогових та цифрових технологій: гібридні системи використовували як аналогові схеми, так і цифрові процесори для обробки даних.
- Збільшена функціональність: ці системи пропонували додаткові функції, такі як самодіагностика та можливість програмування.

Традиційні системи релейного захисту, включаючи електромеханічні та статичні реле, відіграли важливу роль у розвитку електроенергетичних систем. Незважаючи на їх обмеження, вони заклали основу розробки більш сучасних та ефективних систем релейного захисту, які продовжують еволюціонувати з впровадженням нових технологій.



Рисунок 2 . Релейний пристрій

Традиційні методи не повною мірою відповідають вимогам сучасних енергетичних систем. Основні проблеми включають обмежену адаптивність до умов мережі, що динамічно змінюються, недостатню швидкість реакції на аварійні ситуації і складності в інтеграції з новими типами відновлюваних

джерел енергії. Ці виклики вимагають впровадження нових технологій, здатних значно підвищити ефективність та надійність систем релейного захисту. У цьому контексті поява інноваційних рішень у галузі релейного захисту та автоматики відкриває нові можливості для покращення параметрів функціонування та управління енергетичними системами.

2.2 Системи адаптивного релейного захисту

Адаптивні системи релейного захисту являють собою передовий метод захисту електроенергетичних систем, заснований на принципах адаптації до умов експлуатації, що змінюються, і навантажень. Ці системи використовують сучасні технології для аналізу параметрів мережі та самостійного коригування своїх налаштувань у реальному часі, що підвищує їх ефективність та надійність.

Основні принципи роботи адаптивних систем релейного захисту:

- Адаптивні системи релейного захисту інтегрують у себе датчики, мікропроцесорні пристрої та алгоритми машинного навчання, дозволяючи системі реагувати на зміни в електричній мережі.

Основні етапи роботи таких систем включають:

- Моніторинг параметрів мережі: безперервний вимір та аналіз параметрів, таких як напруга, струм, частота та фазові кути.
- Аналіз даних: застосування алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту для оцінки стану системи та прогнозування потенційних проблем.
- Автоматична адаптація: автоматично змінює налаштування захисних реле в залежності від поточних умов роботи з метою оптимізації реагування на можливі аварійні умови.

Переваги адаптивних систем релейного захисту:

- Адаптивні системи надають низку значних переваг у порівнянні з традиційними релейними захистами:

- Підвищена надійність: здатність до адаптації дозволяє системі підтримувати оптимальну роботу навіть за умов, що змінюються, знижуючи ризик виникнення непередбачених аварій.
- Поліпшена точність: завдяки використанню даних у реальному часі та застосуванню алгоритмів аналізу адаптивні системи здатні більш точно ідентифікувати та ізолювати несправності.
- Економічність: скорочення часу простоїв та запобігання великомасштабним аваріям дозволяє знизити витрати на обслуговування та ремонт.
- Гнучкість та масштабованість: системи можуть бути легко адаптовані до різних умов експлуатації та легко масштабуються для захисту як малих, так і великих енергетичних об'єктів.

Незважаючи на значні переваги, системи адаптивного релейного захисту також стикаються з рядом проблем:

- Складність управління: висока складність систем управління може вимагати спеціалізованих знань для налаштування та обслуговування.
- Залежність від даних: якість і точність роботи системи залежать від точності вхідних даних, що вимагає високої якості датчиків і надійності їх роботи.

Безпека: автоматизація та цифровість збільшують ризики, пов'язані з кібербезпекою, вимагаючи додаткових заходів для захисту даних.

Висновок по розділу 2

Адаптивні системи релейного захисту є перспективним напрямом у сфері підвищення надійності електроенергетичних систем. Вони надають можливість для більш гнучкого та ефективного реагування на зміни в роботі енергосистем, хоча й потребують комплексного підходу до реалізації та підтримки.

3. ІНТЕГРАЦІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАШИННОГО НАВЧАННЯ У СИСТЕМИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ

Прогрес у галузі штучного інтелекту (ШІ) та машинного навчання (МН) відкриває нові перспективи для підвищення ефективності та надійності релейного захисту в електроенергетичних системах. Інтеграція цих технологій дозволяє створювати адаптивні системи, здатні самостійно аналізувати операційні дані та оптимально реагувати на зміни в мережевому середовищі.

3.1 Принципи роботи ШІ та МН у релейному захисті.

Штучний інтелект у релейному захисті використовує алгоритми машинного навчання для аналізу великих обсягів даних про стан мережі, включаючи струми, напруги, частоти та інші критичні параметри.

Основні техніки машинного навчання, що застосовуються у релейному захисті:

- Нейронні мережі: моделюють складні нелінійні відносини між вхідними та вихідними даними, дозволяючи точно класифікувати та прогнозувати стан системи.
- Алгоритми класифікації: використовуються визначення типів мережевих порушень і швидкого прийняття рішень необхідність спрацьовування захисту.
- Методи регресії: застосовуються для прогнозування параметрів мережі, які можуть вказувати на проблеми, що розвиваються в електропостачанні.

Використання ШІ в релейному захисті надає низку значних переваг:

- Підвищена надійність: алгоритми МЛ здатні виявляти та запобігати пошкодженням до їх виникнення, таким чином мінімізуючи ризики та наслідки аварій.

- Оптимізація роботи: ШІ може адаптувати параметри системи до поточних умов експлуатації, забезпечуючи ефективніше використання ресурсів.
- Скорочення часу простою: швидка діагностика та вирішення проблем за допомогою ШІ зменшують час, необхідний для відновлення після збоїв.
- Зменшення витрат: автоматизація процесів моніторингу та управління скорочує потребу в людському втручанні та пов'язані з цим операційні витрати.

Незважаючи на численні переваги, інтеграція ШІ та МН у релейний захист також включає низку викликів:

- Складність інтеграції: складні алгоритми вимагають інтеграції з існуючими системами управління та обробки даних, що може бути складно.
- Залежність від якості даних: ефективність алгоритмів машинного навчання безпосередньо залежить від точності, повноти та актуальності вхідних даних.
- Кібербезпека: збільшення кількості цифрових компонентів та мережевих підключень підвищує вразливість перед кібератаками.

Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання в релейний захист є перспективним напрямом, який здатний істотно трансформувати підходи до забезпечення безпеки та надійності електроенергетичних систем. Незважаючи на існуючі труднощі, потенціал цих технологій у галузі передиктивної аналітики та адаптивного управління відкриває нові обрії для оптимізації роботи енергетичних систем.

3.2 Розробка та застосування цифрових релейних захисників

У контексті сучасних тенденцій енергетики особлива увага приділяється розробці та впровадженню цифрових релейних захисників.

Ці пристрої використовують цифрові технології для обробки сигналів та виконання захисних функцій, що є значним кроком вперед у порівнянні з традиційними аналоговими та електромеханічними системами.

Цифрові релейні захисники ґрунтуються на використанні мікропроцесорів та спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу параметрів електричних мереж. Вони приймають вхідні сигнали від датчиків, що проходять через аналого-цифрові перетворювачі, та обробляють їх відповідно до заданих алгоритмів.

Основні компоненти:

- Мікропроцесор: ядро системи, що виконує всі обчислення та обробку даних.
- Пам'ять: зберігає програмне забезпечення та операційні дані.
- Інтерфейси введення-виводу: забезпечують збирання даних від датчиків та комунікацію з іншими пристроями.
- Аналого-цифровий перетворювач (АЦП): перетворює аналогові сигнали від датчиків на цифрову форму для подальшої обробки.

Переваги цифрових релейних захисників:

- Висока точність та швидкість реакції: цифрова обробка даних дозволяє більш точно та швидко реагувати на зміни в мережі.
- Гнучкість налаштувань: цифрові релейні захисники можна легко перепрограмувати і адаптувати під умови експлуатації, що змінюються.
- Інтеграція з системами керування: легко інтегруються із сучасними системами керування та моніторингу, такими як SCADA.
- Функції самодіагностики та самотестування: може автоматично перевіряти свій стан і функціональність, що підвищує надійність системи.

Проте, впровадження цифрових релейних захисників пов'язані з низкою викликів:

- Високі вимоги до кібербезпеки: необхідність захисту від кібератак, оскільки цифрові системи вразливіші для програмного втручання.
- Складність обслуговування: вимагає високої кваліфікації персоналу для ефективного управління та обслуговування.
- Залежність від якості джерел живлення: чутливість до коливань живлення та необхідність у надійних джерелах енергії.
- Цифрові релейні захисники є передовим напрямом у сфері захисту енергетичних систем, пропонуючи поліпшену продуктивність і гнучкість.
 - Вони відіграють ключову роль у підвищенні ефективності, надійності та безпеки сучасних електроенергетичних інфраструктури.

3.3 Використання IoT та інтелектуальних датчиків у релейному захисті та автоматичі

Сучасні технології Інтернету речей (IoT) та інтелектуальних датчиків перетворюють підходи до управління та моніторингу в галузі релейного захисту та автоматичі. Інтеграція цих технологій в електроенергетичні системи дозволяє значно підвищити їх ефективність і надійність за рахунок точного збору даних та оперативного реагування на умови експлуатації, що змінюються.

Технологічні аспекти інтеграції IoT та інтелектуальних датчиків.

Інтелектуальні датчики є пристроями, оснащеними функціями передачі даних і можливістю обробки інформації на місці. Ці датчики здатні самостійно аналізувати параметри, що вимірюються, такі як струм, напруга, температура і вібрація, що дозволяє швидко ідентифікувати аномалії в роботі електричних мереж[15].

Технології IoT забезпечують взаємозв'язок між інтелектуальними датчиками та центральними системами керування. Завдяки IoT дані з датчиків

можуть передаватися в реальному часі, дозволяючи операторам системи негайно реагувати на критичні зміни та оптимізувати параметри роботи мережі.

Переваги використання IoT та інтелектуальних датчиків

- Підвищення точності моніторингу: безперервний збір даних з безлічі точок в мережі дозволяє отримувати повнішу картину її стану.
- Оперативне реагування на збої: миттєва передача даних про порушення в систему керування дозволяє швидко ідентифікувати та локалізувати несправності.
- Предикативне обслуговування: аналіз даних із датчиків може використовуватися для прогнозування потенційних відмов та планування профілактичних заходів, що знижує ризики раптових аварій та дорогого ремонту.
- Покращене управління активами: інтеграція даних в аналітичні платформи оптимізує використання активів і продовжує термін служби обладнання.

Незважаючи на значні переваги, впровадження IoT та інтелектуальних датчиків пов'язане з певними труднощами:

- Безпека даних: збільшення кількості підключених пристроїв посилює ризик кібератак.
- Залежність від якості мережевих з'єднань: постійна потреба у надійних і швидких каналах зв'язку передачі великих обсягів даних.
- Складнощі інтеграції: необхідність адаптації існуючих енергетичних систем під нові технології може вимагати значних часових та фінансових витрат[16].

Висновки по розділу 3

Аналіз сучасних технологічних рішень, таких як штучний інтелект, Інтернет речей та адаптивні системи захисту, підкреслює їхній внесок у покращення управління та моніторингу в умовах постійно зростаючої складності енергетичних мереж.

Застосування даних інновацій демонструє важливість інтеграції сучасних технологічних розробок для адаптації до операційних умов і потреб енергосистем, що змінюються. Впровадження машинного навчання та алгоритмів ШІ для аналітики та прогнозування дозволяє суттєво підвищити точність передбачень та оперативність реакції на потенційні загрози та несправності.

Інтеграція IoT та інтелектуальних датчиків у системи релейного захисту та автоматики є важливим напрямком розвитку енергетичної галузі, здатне суттєво підвищити рівень їх ефективності та надійності. Незважаючи на існуючі виклики, потенціал цієї технології виправдовує інвестиції в її розробку та впровадження.

4. ПРИСТРОЇ ТА БЛОКИ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ДЛЯ ЦИФРОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ

Розглянемо деякі пристрої та блоки релейного захисту, які можуть використовуватися для будівництва нових цифрових підстанцій. Ці вироби реалізуються ТОВ "ЗАВОД УКРМАШПРОМ"

Адреси підприємства:

61046, Україна, м. Харків, вул. Єнакіївська, б.10

03148, Україна, м. Київ, проспект Леся Курбаса, 2Б

1. Блоки релейного захисту для цифрової підстанції серії IED-EP+



Рисунок.4. Блоки релейного захисту для цифрової підстанції

Блоки релейного захисту для цифрової підстанції IED-EP+ — серія сучасних інтелектуальних блоків релейного захисту, автоматики та сигналізації ПАРМА IED-EP+ призначена для застосування в мережах з напругою від 6 до 750 кВ. Підтримка протоколу MEK 61850.

2. Пристрій релейного захисту «Сіріус-2-МЛ-БПТ»

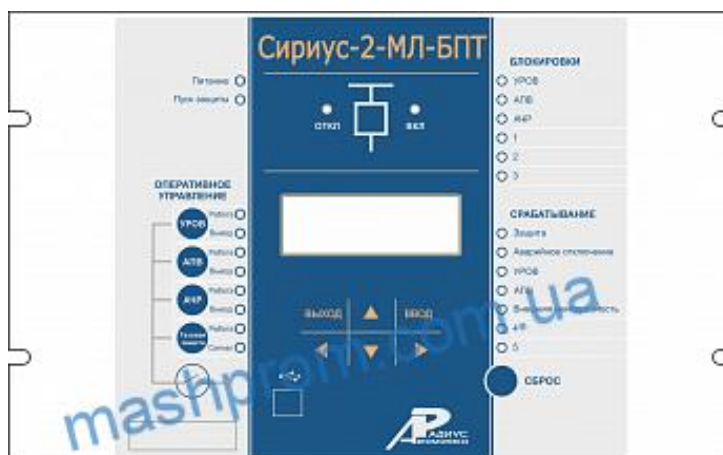


Рисунок 5. Пристрій релейного захисту «Сіріус-2-МЛ-БПТ»

Пристрій призначений для виконання функцій релейної захисту, автоматики, керування та сигналізації приєднань напругою 3-35 кВ. Пристрій має спеціальне виконання «I4», що забезпечує найповніший функціонал при побудові «цифрових підстанцій» та розгортанні «Smart Grid»

3. Мікропроцесорний пристрій захисту "Сіріус-2-ДЗМ"

Мікропроцесорний пристрій захисту «Сіріус-2-ДЗМ» призначений для захисту магістралі резервного живлення власних потреб 6-10 кВ електричних станцій із кількістю приєднань до чотирьох.

Пристрій може застосовуватися для захисту шин та ошин напругою 3-220кВ із фіксованим розподілом приєднань.

Пристрій має спеціальне виконання «I4», що забезпечує найповніший функціонал при побудові «цифрових підстанцій» та розгортанні «Smart Grid».

4. Пристрій «Оріон-РТЗ»

Пристрій «Оріон-РТЗ» призначений для виконання функцій релейної захисту, автоматики, керування та сигналізації приєднань напругою 6–10 кВ, але може застосовуватися і для інших класів напруги.

Пристрій призначений для роботи на підстанціях зі змінним оперативним струмом і може працювати з вимикачами, котушки відключення яких включені «за схемою дешунтування».

Мікропроцесорний пристрій "Оріон-РТЗ" може застосовуватися при побудові високотехнологічних систем РЗА підвищеної економічної ефективності.

5. Пристрій мікропроцесорної захисту «Сіріус-3-ВЧ-02»

Пристрій мікропроцесорної захисту «Сіріус-3-ВЧ-02» призначений для захисту повітряних та кабельних ліній 110-220 кВ у мережах із ефективно заземленою нейтралью. спрямований високочастотний захист (НВЧЗ).). До

складу захисту відносної селективності входять: струмові захисту (ТО та ЗОФ), дистанційні захисту (ДЗ), струмові захисту нульової послідовності (ТЗНП).

Пристрій має спеціальне виконання «I4», що забезпечує найповніший функціонал при побудові «цифрових підстанцій» та розгортанні «Smart Grid».

6. Інтелектуальне реле напруги «Сіріус-2-ТН-К»

Реле "Сіріус-2-ТН-К" призначене для контролю трансформаторів напруги, а також для виконання функцій релейної захисту та автоматики підстанцій.

Інтелектуальне реле напруги "Сіріус-2-ТН-К" може застосовуватися при побудові високотехнологічних систем РЗА підвищеної економічної ефективності.

7. Реле струму «Сіріус-2-Л-К»

Реле струму "Сіріус-2-Л-К" призначене для виконання функцій релейної захисту, автоматики, керування та сигналізації приєднань напругою 3-35 кВ. Реле призначене для захисту повітряних та кабельних ліній, введів, секційних вимикачів, а також трансформаторів, перетворювальних агрегатів тощо.

Інтелектуальне реле струму "Сіріус-2-Л-К" може застосовуватися при побудові високотехнологічних систем РЗА підвищеної економічної ефективності[17].

Висновки по розділу 4

Розглянуто пристрої та блоки релейного захисту, які можуть використовуватися для будівництва нових цифрових підстанцій.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В сучасних умовах стрімкого розвитку технологій та зростання потреб у надійності та ефективності енергопостачання перехід на цифрові підстанції стає нагальною необхідністю. Цифровізація енергетичної інфраструктури є кардинальним кроком до оптимізації роботи електричних мереж, забезпечуючи не лише підвищення їх надійності, але й покращення якості обслуговування споживачів.

Перехід на цифрові підстанції є необхідним кроком для забезпечення надійного та ефективного функціонування енергетичного комплексу, що, в свою чергу, відіграє ключову роль в економічному розвитку та покращенні якості життя населення.

У кваліфікаційній роботі проведено аналіз спроможності промисловості України проводити модернізацію та будівництво сучасних цифрових підстанцій. Проаналізовані характеристики традиційних та цифрових підстанцій, розглянуто різні проектні рішення будови сучасних підстанцій та подано пропозиції щодо впровадження ЦПС.

Розглянуто інновації в області релейного захисту та автоматики, системи адаптивного релейного захисту.

Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання у системи релейного захисту та автоматики – майбутнє країни направлене на економне безаварійне функціонування енергосистеми України.

Розглянуто пристрої та блоки релейного захисту для цифрової підстанції, які реалізуються підприємствами України для модернізації та будівництва цифрових та інтелектуальних підстанцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Цифрова підстанція – цифрове майбутнє. [Digital substation is the digital future. [Internet].. <https://1-engineer.ua>
2. Бовикін В.М., Мокеєв А.В. Приклад використання МЕК 61850 під час створення ССПИ підстанцій // Технічні та програмні засоби систем автоматизації. Телекомунікаційні системи енергетики. - 2015. - № 7. - С. 49-55. [Bovykin VN, Mokeev AV
3. "Цифрова підстанція" <https://digitalsubstation.com>
4. СТО 56947007-29.240.10.248-2017 Норми технологічного проектування підстанцій змінного струму з вищою напругою 35-750 кВ (НТП ПС), п.3. [STO 56947007-29.240.10.248-2017 Norms of technological design of AC substations with high voltage of 35-750 kV (NTP PS)
5. Лундалін А.А., Пузіна Є.Ю., Худоногов І.А., Кашковський В.В. Аналіз надійності електропостачання транспортних систем в залежності від стану пристроїв релейного захисту та автоматики // Сучасні технології. Системний аналіз. Моделювання. - 2019. - № 3. - С. 127-135.
6. Т.І. Друбецька.. Розвиток технологій будівництва цифрових підстанцій <https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/e427bd5d-f400-4683-81a0-d6d738107917/content>
7. Устаткування та технології МОХА для енергетичних підстанцій МЕК 61850. [MOHA Equipment and Technologies for power substations IEC 61850.
8. <https://budport.com.ua>
9. Карасьов О.І., Желєзнов М.М., Білошицький А.В., Шитов Є.А. Пріоритети науково-технологічного розвитку залізничної галузі у контексті цифровізації: зарубіжний досвід // Світ транспорту. – 2019. – Т 17. – № 6. – С. 20–36.
10. Дослідження функціональності цифрових релейних захистів. Стаття «Впровадження та тестування цифрового реле для захисту

енергосистеми» була опублікована в IEEE Transactions on Power Delivery у 2019 році.

11. Застосування машинного навчання для оптимізації РЗА. Стаття "Machine Learning Models for Electrical Fault Detection in Power Networks", опублікована в журналі Energy Systems у 2020 році.
12. Адаптація систем РЗА до інтеграції поновлюваних джерел енергії. Стаття "Challenges and Solutions for Relay Protection in Renewable Energy Integrated Power Systems", опублікована у журналі Renewable Energy у 2021 році.
13. Електромеханічні реле. <https://electrocontact.com.ua>
14. Статичні реле. <https://ua.kisho-ceramic-coating.com>
15. Інтелектуальні датчики та їх використання. <https://electricalschool.info>
16. Що таке IoT і що про нього слід знати. <https://www.atiko.com.ua>
17. ТОВ "ЗАВОД УКРМАШПРОМ " <https://www.mashprom.com.ua>