МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії та енергетики
Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Почивалова Поліна Юріївна

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Розробка пропозицій щодо створення методики керування роботою релейного захисту з урахуванням впливу потенційних відмов
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

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

Почивалова П.Ю.
(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

Почивалова П.Ю. Розробка пропозицій щодо створення методики керування роботою релейного захисту з урахуванням впливу потенційних відмов. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавр за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Сучасні системи діагностики релейного захисту відіграють ключову роль у забезпеченні надійності та безпеки електроенергетичних систем. З розвитком технологій та збільшенням вимог до якості обслуговування, діагностика релейного захисту набуває нових форм і методів. У роботі розглядаються приклади найбільш ефективних систем діагностики, що застосовуються сьогодні та показано деякі методи машинного навчання.

Ключові слова: електричні підстанції, система захисту і автоматизації, штучний інтелект, машинне навчання.

ABSTRACT

Pochyvalova P.Yu. Development of proposals for creating a methodology for managing the operation of relay protection, taking into account the impact of potential failures. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

Modern relay protection diagnostic systems play a key role in ensuring the reliability and safety of electrical power systems. With the development of technology and increasing demands on service quality, relay protection diagnostics is acquiring new forms and methods. The paper considers examples of the most effective diagnostic systems used today.

Keywords: electrical substations, protection and automation system, artificial intelligence, machine learning.

ЗМІСТ

ВСТУП

В умовах зростаючої складності електричних мереж та вимог до безперервності електропостачання, питання надійної та ефективної роботи релейного захисту (РЗ) набуває особливої **актуальності**. Класичні методи керування РЗ, що базуються на детермінованих моделях, не завжди здатні адекватно реагувати на зміни в режимах роботи мережі та потенційні відмови елементів РЗ.

Потенційні відмови, зокрема, несправності окремих компонентів, зношення, вплив зовнішніх факторів, можуть призвести до неселективної роботи захисту, помилкових відключень та, як наслідок, до значних економічних збитків та зниження надійності електропостачання.

Першим прикладом є система моніторингу на основі цифрових реле, які здатні не лише виконувати функції захисту, але й збирати дані про працездатність обладнання. Такі системи, як правило, використовують алгоритми машинного навчання для аналізу великих обсягів інформації, що дозволяє виявляти потенційні несправності до їх виникнення. Наприклад, впровадження цифрових реле в розподільних мережах суттєво підвищило рівень автоматизації та передбачуваності обслуговування.

Ще одним важливим аспектом є використання технологій розподіленого моніторингу, таких як системи SCADA. Ці системи забезпечують централізований збір даних від безлічі об'єктів, що дозволяє операторам в реальному часі відстежувати стан обладнання та оперативно реагувати на виникнення аварійних ситуацій. Це значно скорочує час на діагностику та підвищує ефективність вирішення проблем.

Крім того, варто відзначити використання методів статистичного аналізу, таких як предиктивна аналітика. Дані та параметри релейного захисту аналізуються на предмет виявлення закономірностей і аномалій, що дає можливість прогнозувати можливі відмови та проводити профілактичне обслуговування. Одним з прикладів реалізації такого підходу є інтеграція алгоритмів аналітики прогнозу в системи моніторингу стану трансформаторів.

Сучасні системи діагностики релейного захисту демонструють високу ступінь автоматизації та ефективності. Застосування цифрових технологій, моніторингу в реальному часі та аналітичних методів сприяє не лише підвищенню надійності енергетичних об'єктів, але й оптимізації процесів їх експлуатації. Все це робить діагностику релейного захисту найважливішим аспектом функціонування сучасних електроенергетичних систем.

Метою роботи є застосування класичних алгоритмів машинного навчання та методів аналізу даних для розпізнавання складних нормальних і аварійних режимів у нових сучасних електричних мережах (електричних мережах) з метою покращення релейного захисту та пристрої автоматизації.

Предметом дослідження в роботі є розробка пропозицій щодо створення методики керування роботою релейного захисту, яка враховує вплив потенційних відмов.

Об’єкт дослідження є процес розробки та впровадження цифрових рішень, здатних значно покращити функціонування релейного захисту інфраструктури електропостачання.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

1. Почивалова П. Ю.

МАШИННЕ НАВЧАННЯ У ЗАВДАННІ РОЗРОБКИ НОВИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ
«СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2024» ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ 31 жовтня 2024 року м. Житомир.

2. Почивалова П. Ю., Поліщук П. М.

ВЗАЄМОДІЯ SCADA ТА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ: СИНЕРГІЯ ДЛЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ.
НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ 23 квітня 2025 р. м. Житомир

РОЗДІЛ 1
ЦИФРОВЕ РЕЛЕ ЗАХИСТУ ЯК МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Сучасна енергетична система, окрім телекомунікаційних систем, є одним із найбільших комплексів, створених і керованих людиною, як з точки зору географічних відстаней (тисячі кілометрів), так і з точки зору генерованої та переданої потужності (тисячі мільйонів ват). Така система потребує точного та різноманітного керування з функціями захисту як першочерговими, зважаючи на найвищий пріоритет безпеки.

Енергетична система складається з низки взаємопов'язаних елементів, таких як синхронні генератори, силові трансформатори, лінії електропередачі, шини, батареї конденсаторів тощо, які забезпечують безперервне виробництво, передачу та розподіл електроенергії кінцевим споживачам. Однак, кожен елемент в енергетичній системі може зазнавати пошкоджень (коротких замикань) через погіршення ізоляції, грози, помилки персоналу тощо. Оскільки у сучасних енергетичних системах генерується та передається величезна кількість енергії, у разі виникнення пошкодження, пошкоджений елемент має бути якомога швидше (за кілька десятків мілісекунд) відключений від решти справної (здорової) системи шляхом розмикання відповідних вимикачів (відключення). Очевидно, що така операція повинна виконуватися автоматично. Комплекс пристроїв, призначених для цієї мети, визначається як релейний захист енергосистеми.

Загалом, система захисту являє собою свого роду "нейронний" комплекс, який спостерігає за "м'язовим" елементом енергосистеми і захищає як цей елемент від повного пошкодження, так і решту системи від спричинених збурень. Щоб виконати покладені обов'язки, будь-яке захисне реле вимірює набір сигналів (струми, напруги, температури тощо) і, ґрунтуючись на цих вимірюваннях, автоматично вирішує, чи зазнає захищений елемент пошкодження, і, отже, чи потрібно ініціювати відключення та подавати сигнали тривоги.

Спочатку захисні реле будувалися на електромеханічній технології; згодом, після винаходу транзистора, перейшли на електронні (статичні) аналогові схеми; і, нарешті, приблизно п'ятнадцять років тому, після поширення достатньо дешевих і надійних мікропроцесорів, вони перейшли на цифрову технологію [1,2].

В захисті енергосистем при роботі в реальному часі мається на увазі:

— здатність вимірювати та обробляти вхідні сигнали з частотою дискретизації на рівні 1 кГц або більше;

— здатність реагувати на внутрішні пошкодження в захищеному елементі протягом декількох десятків мілісекунд або швидше.

У цій роботі розглядається захисне реле як мікропроцесорна система реального часу та представлено її базові архітектури, проблеми проектування та прийняті рішення.

1.1 Характеристики продуктивності та експлуатаційні характеристики цифрових реле.

Основні переваги, отримані від застосування цифрового захисту, в загальному поділяються на п'ять основних сфер.

1.1.1 Надійність

Цифрові реле можуть бути сконструйовані для самостійного контролю. Процес самоконтролю може бути організований різними способами, включаючи виконання спеціальних програмних функцій та/або проведення додаткових вимірювань.

Окремою проблемою є те, як обробляти результати самоперевірки. Зазвичай, само контролююче реле вживає наступних дій:

— перезапустити мікропроцесорну систему і/або,

— заблокувати певні функції реле і/або,

— переключити функції захисту на резервні реле і/або,

— підняти рівень тривоги (увімкнути сигналізацію).

Слід зазначити, що самоконтроль сам по собі не покращує безпосередньо надійність, але він забезпечує спосіб сигналізувати про робочий стан обладнання захисту. Це, у свою чергу, має непрямий позитивний вплив на загальну надійність, зменшуючи кількість потенційних прихованих відмов.

Безумовно, надійність також покращується шляхом впровадження певного рівня надмірності в апаратне та/або програмне забезпечення цифрового реле [1, 2].

1.1.2 Гнучкість

Цифрові реле, як програмовані пристрої, є значно гнучкішими, ніж їхні аналогові попередники. Зазвичай, одна й та ж апаратна платформа використовується як основа для різних типів реле. Це зменшує витрати на розробку, виробництво та обслуговування, покращує надійність, тощо. Налаштування реле стає дуже простим шляхом модифікації програмного забезпечення для задоволення різноманітних потреб енергетичних компаній.

1.1.3 Експлуатаційні характеристики

Дослідження та практичний досвід показали, що цифрові реле можуть працювати значно краще, ніж звичайні реле. Це особливо актуально для довгих та/або серійно компенсованих ліній електропередачі та багатокінцевих ланцюгів [l]. Цифрові реле мають ряд природних переваг, наприклад, пам'ять, можливість формування складних операційних характеристик, оцінка складних еталонних сигналів в режимі реального часу тощо.

1.1.4 Оцінка витрат та вигіди

Вартість апаратного забезпечення зменшується з кожним роком, але вартість програмного забезпечення, особливо в галузі релейного захисту енергосистем, яка є досить мало об’ємною промисловістю, часто переважає у загальній вартості. Однак, значне покращення характеристик цифрових реле дозволило зменшити співвідношення витрат та вигід [1,2].

1.1.5 Інші функції та можливості

З впровадженням мікропроцесорної технології стали можливими абсолютно нові функції та можливості. Зокрема, до них відносяться:

— зв'язок між реле для підвищення надійності та прискорення роботи,

— аналіз після аварійних режимів усіх зафіксованих перехідних процесів,

— обчислення відстані до пошкодження (місця пошкодження) після

— виникнення аварії,

— адаптивність,

— налаштування, керовані ієрархічними системами (комп'ютерами підстанцій) та іншими.

1.2 Апаратне забезпечення цифрових реле

Загальна схема апаратного забезпечення цифрового реле показана на рис. 1.

1.2.1 Вхідні перетворювачі

Аналогові вхідні змінні, наприклад струми та напруги, електрично ізольовані від внутрішніх ланцюгів вхідними трансформаторами з заземленими екранами між первинними та вторинними обмотками. Сигнали струму (номіналом 1А або 5А) та напруги (номіналом 110В) обробляються та перетворюються на їх представлення в напрузі.

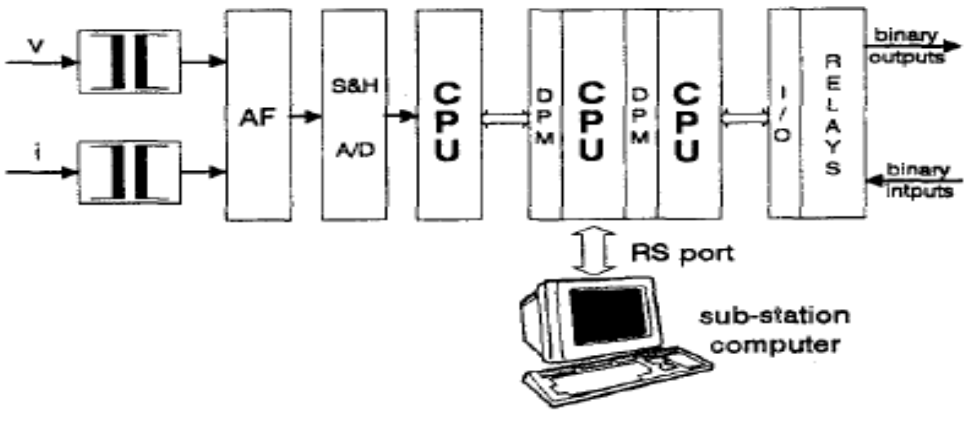

Рис.1. Типова апаратна конфігурація цифрового реле.

1.2.2 Антиаліасинг аналогового фільтра

Аналоговий фільтр (AF) обмежує спектр сигналу відповідно до закону Найквіста. Часто використовується низькочастотний пасивний RC-ланцюг другого порядку.

1.2.3 S&H та A/D (АЦП) перетворювач

Зазвичай цифровий реле складається з одного аналого-цифрового перетворювача. Однак досить часто певні сигнали потрібно обробляти паралельно (наприклад, напругу та струм, на основі яких цифрово обчислюється імпеданс). Тому зазвичай встановлюється блок зберігання та утримання сигналів, який заморожує вхідні сигнали, що наступно обробляються послідовно. Іншим рішенням є уникнення блоку зберігання та налаштування послідовності аналогова-цифрового перетворення, яка враховує подальші зв'язки між вхідними сигналами. Однак це прийнятна лише для швидких аналогова-цифрових перетворювачів.

Оскільки сучасні цифрові реле базують свою роботу на інформації, що передається компонентами основної частоти напруг і струмів, частота дискретизації АЦП варіюється від 1 кГц до декількох кГц, що становить 20 і більше вимірювань за період основної частоти (50 Гц або 60 Гц). Однак, певні спеціальні реле (наприклад, реле на основі біжучої хвилі) вимагають значно вищої частоти дискретизації.\

Оскільки напруги в енергетичній системі можуть зменшуватися (навіть до нуля) або наростати, але не більше ніж на 100%, 12-бітна роздільна здатність АЦП в аналогових каналах зазвичай є достатньою [1,2]. Струми, у свою чергу, можуть досягати рівня десятків, якщо не сотень своїх номінальних значень під час коротких замикань. Тому 16-бітна роздільна здатність є технічним мінімумом для струмових каналів цифрового реле [1,2]. Зазвичай єдиний АЦП підходить як для напругових, так і для струмових каналів: або це 16- або більше бітний перетворювач, або це 12-бітний перетворювач із додатковою схемою для динамічної зміни масштабу.

Оскільки зазвичай шість аналогових сигналів обробляються реле (три напруги та три струми), час перетворення аналого-цифрового перетворювача, менш ніж 10 мс, є достатнім. Це робить загальний час перетворення меншим за 0,1 мс, що становить лише близько 10% інтервалу дискретизації та залишає 90% для основних обчислень.

1.2.4 Фронтальний процесор (CPU)

Фронтальний процесор керує аналого-цифровим перетворювачем і зазвичай виконує цифрову смугову фільтрацію вхідних сигналів. Залежно від обчислювальної потужності фронтального процесора, тут також може виконуватися частина основних обчислень, таких як оцінка ортогональних компонент, ДПФ (дискретне перетворення Фур'є), обчислення фазових зсувів тощо. Результати надсилаються на головний процесор через Двопортову Пам'ять (DPM).

1.2.5 Головний процесор

Головний процесор (або процесори, що працюють паралельно на шині) виконує запрограмований алгоритм захисту, який є "мозком" будь-якого захисного реле. Сам алгоритм захисту зазвичай являє собою послідовність обчислень певних характеристик вхідних сигналів, таких як СКЗ, амплітуди гармонік, імпеданс, активна та реактивна потужності, фазові зсуви тощо. Ці величини дозволяють розпізнати, чи є захищений елемент справним або пошкодженим, та прийняти первинне рішення щодо захисту (відключення).

1.2.6 Логічний процесор

Логічний процесор аналізує результати онлайн-обчислень, що надаються головним процесором, і зовнішні двійкові вхідні сигнали, щоб прийняти рішення про захист, а також генерує аварійні сигнали та ініціює певні процедури для зовнішніх пристроїв.

1.2.7 Дискретні входи

Дискретні входи надають частину інформації, важливої для належної роботи реле. Ця інформація містить:

— стан (положення) автоматичних вимикачів та розподільних пристроїв,

— стан інших захисних реле,

— зовнішні блокування,

— та інше.

Ці вхідні сигнали електрично ізольовані від технологічної проводки за допомогою вхідних реле або оптопар. Часто необхідна певна фільтрація, щоб уникнути хибного розпізнавання стану контакту, особливо під час перехідних процесів. Тут часто вводиться певна міра резервування шляхом надання обох контактів (положення та заперечення). Частота дискретизації для двійкових входів може бути значно нижчою, ніж для аналогових входів (інтервал дискретизації на рівні приблизно 10 мс).

1.2.8 Дискретні вихідні сигнали

Дискретні вихідні сигнали зазвичай включають:

— команду відключення на котушки вимикача,

— аварійні сигнали,

— сигнали самоконтролю,

— блокування,

— та інші.

Як правило, дискретні вихідні сигнали ізольовані за допомогою вихідних допоміжних реле, що зазвичай працюють на постійному струмі 24 В або 110 В, або 220 В.

1.2.9 Інтерфейси

Цифрове реле зазвичай оснащене декількома інтерфейсами, що забезпечують зв'язок з:

— місцевою клавіатурою та дисплеєм,

— комп'ютером підстанції,

— віддаленими реле,

— іншими пристроями (принтером, покажчиком місця пошкодження, модемом тощо).

RS232 в наш час часто використовується як комунікаційний порт [2].

1.2.10 Електроживлення

Надійне електроживлення є надзвичайно важливим для роботи захисних реле. Імпульсні джерела живлення працюють як на постійному, так і на змінному напругах з номінальними значеннями, які використовують комунальні підприємства в своїх підстанціях (постійний 110В, 220В, змінний 220В тощо). Джерела живлення для цифрових реле часто проектуються так, щоб витримувати переривання електропостачання тривалістю 2-3 секунди, виконуючи певною мірою функцію малогабаритних систем безперебійного живлення.

1.2.11 Канали зв'язку

Реле захисту обмінюються даними між собою, особливо у випадку ліній електропередачі, де два реле, розташовані на обох кінцях лінії (тобто на відстані сотень кілометрів одне від одного), обмінюються певною кількістю даних (рис. 2).

У сфері цифрових релейних захистів для цієї мети використовуються три типи каналів зв'язку:

— високочастотні сигнали по проводах ліній електропередачі (через ємнісний
зв'язок),

— волоконне-оптичні канали [3],

— мікрохвильові канали [4].

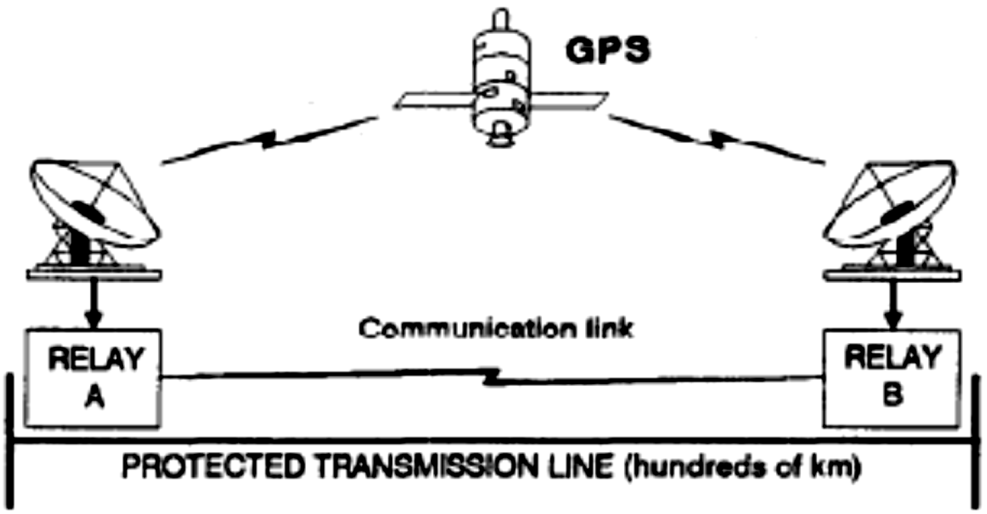

Рис. 2. Два захисних реле (A та B), синхронізовані за допомогою GPS та з’єднані лінією зв’язку.

Незалежно від природи каналу зв'язку, він повинен забезпечувати надійну передачу обсягу інформації на рівні кількох сотень байтів протягом кожного періоду дискретизації (тобто приблизно кожні l мс). Слід пам'ятати, що ключовим моментом є не швидкість, а надійність каналу зв'язку.

1.2.12 Синхронізація вибірки

Коли два або більше реле, розташованих географічно на різних кінцях багатокінцевого захищеного елемента (такого як лінія електропередачі), працюють на основі диференційного принципу, їхні тактові генератори вибірки повинні бути синхронізовані з точністю, кращою за приблизно 5 мкс [5]. В даний час Глобальна система позиціонування (GPS), що забезпечує точність 0,2-0,5 мкс, зазвичай використовується для синхронізації цифрових захисних реле [5] (Рис. 2).

Висновки по першому розділу

У розділі розглянута роль цифрового реле захисту як мікропроцесорної системи реального часу у сучасних енергетичних системах, що є складними конструкціями з численними взаємопов'язаними елементами. Підкреслюється важливість автоматичного відключення пошкоджених компонентів для забезпечення безпеки. Описуються етапи еволюції технологій релейного захисту, акцентуючи увагу на переході від електромеханічних реле до цифрових. Вивчаються основні характеристики цифрових реле, такі як надійність, гнучкість,

експлуатаційні характеристики та нові можливості, що виникають завдяки мікропроцесорній технології. Окрім цього, детально аналізується структура апаратного забезпечення цифрових реле, включаючи компоненти, такі як вхідні перетворювачі, мікропроцесори та канали зв’язку. Зазначається важливість надійності та синхронізації в роботі реле, особливо в контексті обміну інформацією між віддаленими реле у випадках аварійних ситуацій.

РОЗДІЛ 2

ВЗАЄМОДІЯ SCADA ТА РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ: СИНЕРГІЯ ДЛЯ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

У сучасній енергетичній інфраструктурі, системи SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) та релейний захист (РЗ) виступають як ключові елементи, що забезпечують стабільність і надійність електропостачання. Їх взаємодія є складним і критично важливим процесом, спрямованим на запобігання аварійним ситуаціям та мінімізацію наслідків у разі їх виникнення.

SCADA забезпечує оператора диспетчерського пункту інформацією про стан обладнання, режими роботи мережі та параметри електроенергії. Це дозволяє здійснювати моніторинг і управління енергосистемою в реальному часі. Дані, отримані SCADA, відіграють важливу роль для РЗ, оскільки надають контекст для прийняття рішень.

РЗ, у свою чергу, є автоматичною системою, призначеною для виявлення та відключення пошкоджених ділянок мережі. Вона працює на основі заданих алгоритмів і уставок, реагуючи на зміни параметрів, що свідчать про аварійний режим. Інтеграція РЗ з SCADA дозволяє оперативно отримувати інформацію про спрацювання захисту, тип пошкодження та відключені елементи мережі.

Взаємодія цих систем здійснюється за допомогою обміну даними по різних протоколах зв'язку. SCADA передає команди управління та уставки в пристрої РЗ, а також отримує інформацію про їх стан і роботу. Ця інтеграція дозволяє:

- підвищити швидкість реагування на аварії. Оперативна інформація про спрацювання РЗ дозволяє диспетчеру швидко оцінити ситуацію та вжити заходів щодо відновлення електропостачання;
- оптимізувати режими роботи мережі: Аналіз даних, отриманих від РЗ, дозволяє виявляти потенційні проблеми та оптимізувати параметри енергосистеми для підвищення її стійкості;
- поліпшити аналіз аварійних ситуацій: Запис даних про роботу РЗ і SCADA в процесі аварії дозволяє провести детальний аналіз причин і наслідків, що необхідно для запобігання подібним ситуаціям у майбутньому.

Взаємодія систем SCADA і релейного захисту є невід'ємним компонентом сучасної енергетичної інфраструктури. Вона дозволяє підвищити надійність, безпеку та ефективність роботи енергосистеми, мінімізуючи наслідки аварійних ситуацій та забезпечуючи безперебійне електропостачання споживачів. Подальший розвиток і вдосконалення інтеграції цих систем є пріоритетним завданням у забезпеченні стабільної та безпечної роботи енергетики.

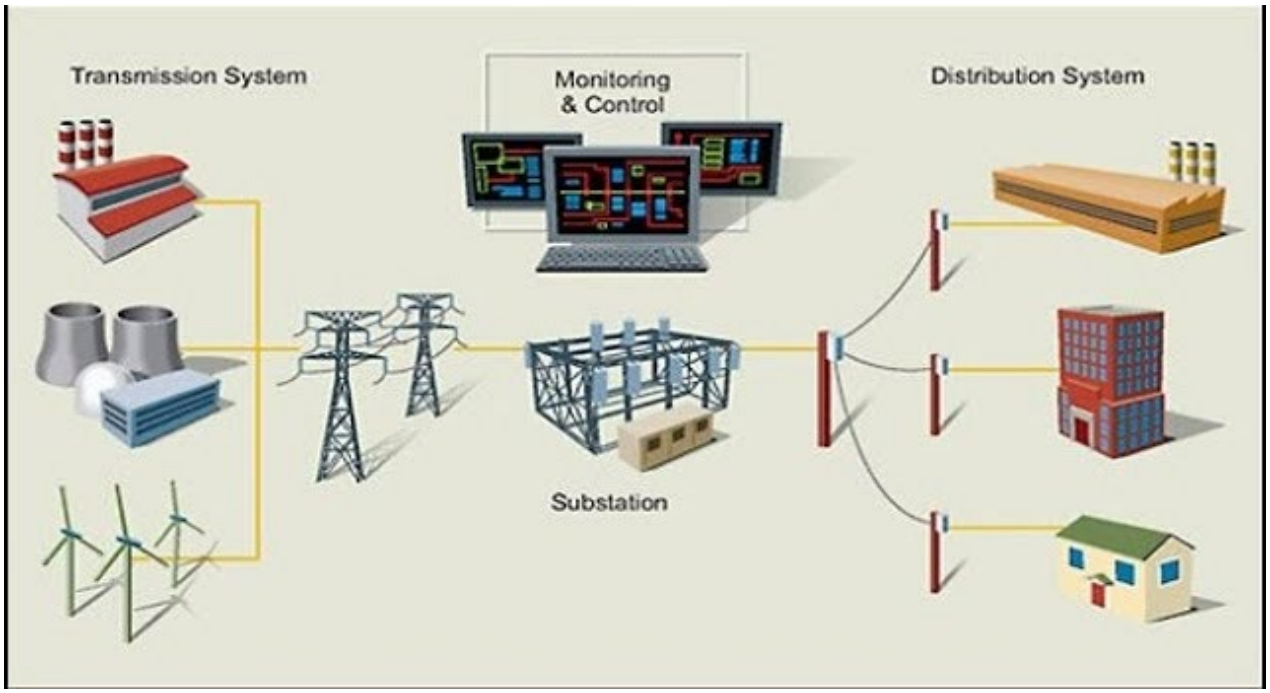

Рис. 3. Ілюстрація використання SCADA (Системи керування та збору даних) в системі електропостачання.

Основні компоненти включають:

– Передача (Transmission System): Система, що відповідає за передачу електроенергії від електростанцій до підстанцій.

– Підстанція: Вузлова точка, де відбувається перетворення напруги для подальшої передачі або розподілу електроенергії.

– Моніторинг і контроль (Monitoring & Control): Центральний елемент SCADA, який дозволяє відстежувати та керувати станом і роботою різних компонентів електроенергетичної системи в реальному часі.

– Розподільча система (Distribution System): Мережа, через яку

електроенергія доставляється до кінцевих споживачів, включаючи житлові будинки та підприємства.

Показано інтеграцію всіх цих елементів, що дозволяє ефективно управляти потоками електроенергії, забезпечувати надійність і безпеку системи, а також швидко реагувати на виникнення нештатних ситуацій.

2.1 Компоненти SCADA-систем

2.1.1Диспетчерське управління

SCADA-системи дозволяють операторам здійснювати нагляд та керувати загальним функціонуванням енергосистем. Вони можуть дистанційно керувати пристроями, коригувати налаштування та реагувати на надзвичайні ситуації в режимі реального часу.

2.1.2 Збір даних

Однією з основних ролей SCADA є збір даних. Вона збирає дані з датчиків, лічильників та інших пристроїв, розгорнутих по всій енергомережі. Ці дані включають рівні напруги, потоки струму, стан обладнання та умови навколишнього середовища.

2.1.3 Інтерфейс людина-машина

Інтерфейс людина-машина (HMI) надає операторам графічне представлення енергосистеми. Він пропонує інтуїтивно зрозумілі інструменти для моніторингу та управління різними процесами, дозволяючи операторам швидко приймати обґрунтовані рішення.

2.1.4 Роль SCADA в автоматизації енергосистем

SCADA відіграє ключову роль в автоматизації операцій енергосистеми. Інтегруючи передові алгоритми керування та логіку прийняття рішень, вона забезпечує автономні дії, такі як виявлення, ізоляція та відновлення пошкоджень (FDIR), відключення навантаження та регулювання напруги.

2.2 Переваги SCADA в енергосистемах

2.2.1 Покращений моніторинг та управління

Системи SCADA забезпечують видимість операцій енергосистеми в режимі реального часу, дозволяючи операторам швидко виявляти проблеми та вживати коригувальних заходів. Це призводить до підвищення надійності та стабільності мережі.

2.2.2 Підвищення ефективності

Оптимізуючи використання ресурсів і мінімізуючи час простою, SCADA допомагає енергетичним компаніям працювати ефективніше. Вона забезпечує прогнозне обслуговування, оптимізацію активів і реагування на попит, що призводить до економії коштів і підвищення продуктивності.

2.2.3 Швидша реакція на пошкодження

У разі пошкодження або відключення електроенергії, системи SCADA забезпечують швидке виявлення та ізоляцію пошкодженої ділянки. Це мінімізує вплив на споживачів і скорочує тривалість перерв в обслуговуванні[6].

2.3 Застосування SCADA в енергетичних системах

2.3.1 Автоматизація підстанцій

SCADA-системи широко використовуються для автоматизації підстанцій, де вони здійснюють моніторинг та керування обладнанням, таким як вимикачі, трансформатори та перемикачі. Це покращує надійність та ефективність підстанцій, зменшуючи потребу в ручному втручанні.

2.3.2 Управління розподілом

SCADA відіграє вирішальну роль в управлінні розподілом, оптимізуючи потік електроенергії від підстанцій до споживачів. Це допомагає енергопостачальним компаніям балансувати попит і пропозицію, керувати рівнями напруги та мінімізувати втрати в розподільній мережі.

2.3.3 Управління навантаженням

Завдяки моніторингу моделей споживання енергії в реальному часі, SCADA-системи дозволяють енергопостачальним компаніям впроваджувати стратегії управління попитом. Це включає в себе обмеження навантаження, згладжування піків споживання та динамічне ціноутворення для оптимізації використання ресурсів та забезпечення стабільності мережі.

2.3.4 Віддалені термінальні пристрої (RTU)

SCADA-системи використовують віддалені термінальні пристрої (RTU) для взаємодії з польовими пристроями, такими як датчики, реле та перемикачі. RTU збирають дані з цих пристроїв і передають їх до центрального диспетчерського пункту, забезпечуючи віддалений моніторинг та керування[7].

Висновки по другому розділу

Взаємодія систем SCADA та релейного захисту є критично важливою для забезпечення надійності та безпеки сучасних енергетичних систем. SCADA надає інформацію про стан обладнання та параметри електропостачання в реальному часі, що дозволяє диспетчерам ефективно управляти мережею.

Релейний захист автоматично виявляє пошкодження та відключає відповідні ділянки, використовуючи алгоритми та уставки. Інтеграція цих систем покращує швидкість реагування на аварії, оптимізує роботу мережі та сприяє детальному аналізу аварійних ситуацій. SCADA-системи також забезпечують автоматизацію процесів, покращують моніторинг і управління, що веде до підвищення ефективності енергетичних компаній та зменшення впливу аварій на споживачів. Дальше вдосконалення цієї інтеграції є пріоритетним завданням для стабільної роботи енергетичної інфраструктури.

РОЗДІЛ 3

МАШИННЕ НАВЧАННЯ У ЗАВДАННІ РОЗРОБКИ НОВИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АВАРІЙНИХ РЕЖИМІВ

3.1 Сучасні методики управління роботою релейного захисту з урахуванням впливу потенційних відмов

В умовах сучасного енергопостачання важливість надійної роботи релейного захисту не може бути недооцінена. Ефективне управління цією системою вимагає застосування передових методик, які дозволяють мінімізувати наслідки потенційних відмов і забезпечити стабільність роботи енергетичних мереж.

Однією з сучасних методик є застосування алгоритмів, основаних на штучному інтелекті, які здатні аналізувати дані в реальному часі та прогнозувати можливі відмови. Ці алгоритми використовують машинне навчання та великі дані для виявлення закономірностей у роботі релейного захисту. Це дозволяє не лише оперативно виявляти аномалії, але й вживати превентивні заходи для їх усунення до того, як вони призведуть до серйозних збоїв.

Ще одним важливим напрямком є впровадження систем моніторингу та діагностики, які дають можливість безперервно відстежувати стан захисного обладнання. Завдяки сучасним датчикам і сенсорам можна своєчасно виявляти найменші відхилення в роботі, що, у свою чергу, дозволяє оперативно реагувати на загрози. Це не лише підвищує надійність системи, але й знижує витрати на її обслуговування.

Крім того, варто відзначити важливість навчання та підвищення кваліфікації фахівців, які працюють з релейним захисним обладнанням. Розуміння сучасних методик і технологій, а також вміння застосовувати їх на практиці, мають вирішальне значення для ефективного управління захистом і мінімізації ризиків відмов.

Таким чином, сучасні методики управління роботою релейного захисту з урахуванням впливу потенційних відмов передбачають інтеграцію сучасних технологій, активне використання аналітики та постійне навчання кадрів. Ці заходи спрямовані на створення більш стійкої та надійної енергетичної інфраструктури, здатної ефективно функціонувати в умовах постійно змінюваного зовнішнього середовища.

3.2 Машинне навчання

Термін "штучний інтелект" (ШІ) узагальнює досить широкий спектр різних алгоритмів для аналізу інформації та прийняття рішень, часто імітуючи людську когнітивну діяльність [8-10].

Машинне навчання (Рис. 4) є розділом штучного інтелекту, призначеним для створення алгоритмів, які можуть навчатися на емпіричних даних [11-14]. На відміну від статистичних методів, методи машинного навчання безпосередньо аналізують випадки (реалізації) навчальної вибірки, а не її статистичні характеристики. Залежно від розв'язуваної задачі, а також даних, що використовуються для навчання, алгоритми поділяються на навчання з учителем та навчання без учителя.

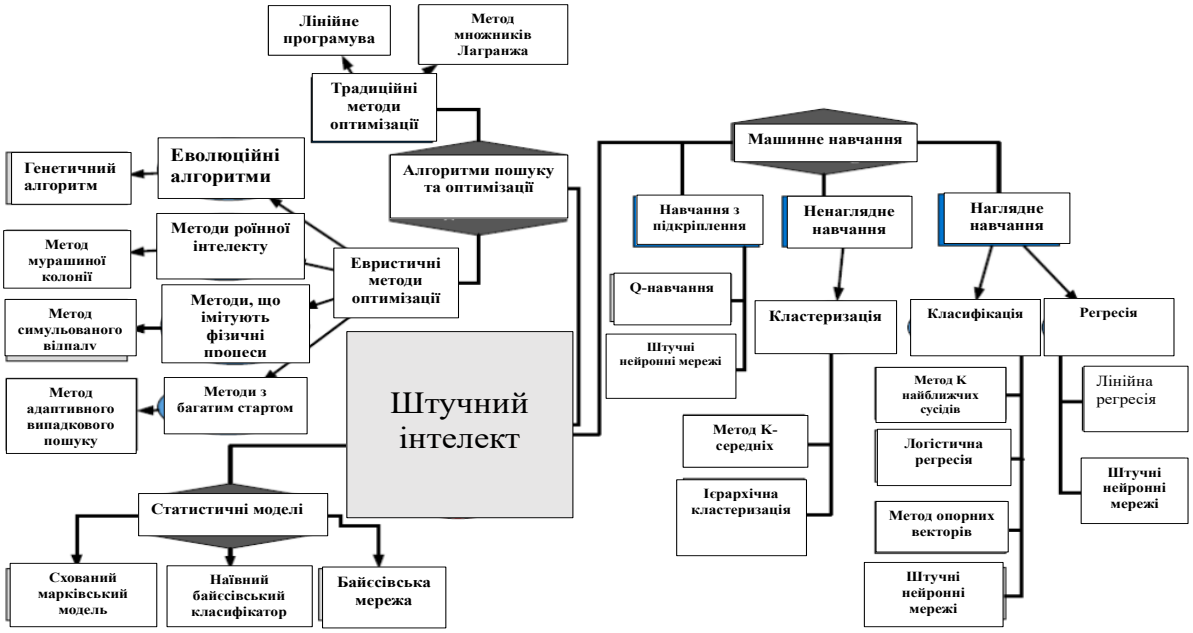

Рис. 4. Основні напрямки та методи штучного інтелекту.

Алгоритми навчання без учителя призначені для виявлення прихованих шаблони проектування у вхідній інформації. Вони використовують "некласифіковані" дані та вимагають мінімального втручання людини. Типовою задачею неконтрольованого навчання є задача кластеризації, тобто завдання об'єднання об'єктів у відносно однорідні групи (кластери).

Супервізоване навчання передбачає формування алгоритмів, здатних прогнозувати значення невідомої величини на основі певного вектору ознак. Бажане значення залежить від них. Навчальна вибірка складається з набору векторів даних, для яких значення цільової функції відоме. У випадку, коли цільова змінна є безперервною, така задача називається регресійною задачею. Якщо спостережуваний вектор ознак потрібно асоціювати з дискретним значенням з певного списку, то така задача називається задачею класифікації.

Як і в інших сферах штучного інтелекту, машинне навчання активно досліджується для можливих застосувань в електроенергетичній промисловості, зокрема в релейному захисті..

Важливим етапом у процесі розробки є вибір та навчання алгоритмів, які безпосередньо вирішують питання роботи захисту в аварійних режимах. Завдання побудови навчальних модулів РПА на основі "мічених" (класифікованих) модельних даних є типовим завданням супервізованого навчання, а саме, задачею класифікації. Далі ми аналізуємо застосування класичних алгоритмів машинного навчання в задачі класифікації режимів аварійного електропостачання, які також є найпоширенішими у вирішенні задач розпізнавання образів.

3.3 Застосування моделювання у задачі класифікації режимів аварійного електропостачання

Як джерело даних для навчання та аналізу вивчених алгоритмів машинного навчання, розглянемо ділянку мережі з джерелом розподіленої генерації (Рисунок 2). На рисунку показані як постійні, так і змінні параметри моделі симуляції. Сформулюємо задачу розпізнавання наступним чином:

необхідно розробити елемент спрацьовування для пристрою RPA, встановленого на початку лінії ω1, який забезпечує захист лінії від трифазних та фазо-фазних коротких замикань. У цьому випадку повинні бути реалізовані відхилення від робочих режимів та режимів самозапуску. В результаті моделювання в Matlab були побудовані всі можливі режими роботи розглянутої електричної енергетичної системи (Рисунок 2), статистичні розподіли ефективного значення діючого струму в робочих режимах, режимах самозапуску та під час коротких замикань на лінії ω1 (Рис. 5).

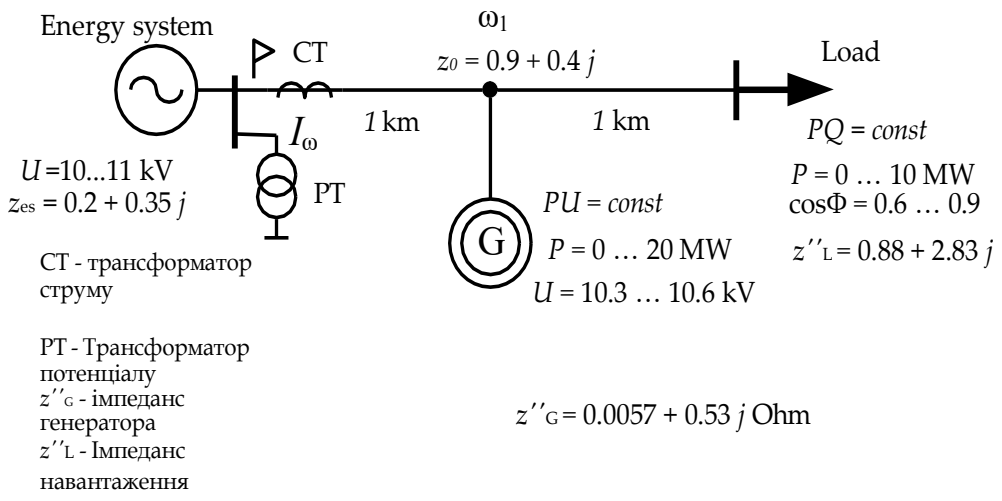

Рис. 5. Схема ділянки мережі, що захищається.

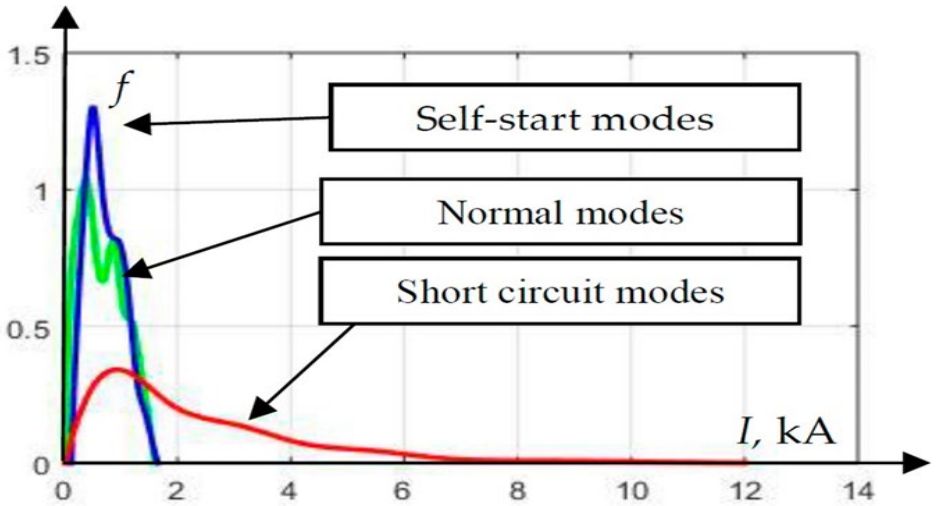

Рис. 6. Розподіл струму аналізованої фази в контролі

З рис. 6. видно, що значна частина струмів аварійного короткого замикання виявилася порівнянною за величиною з нормальними струмами і

струмами самозапуску навантаження. Це пов'язано з тим, що генератор, включений в розгалуження, може зменшувати частку струму короткого замикання, що протікає через місце установки захисту, тим самим знижуючи її чутливість [15]. Очевидно, що застосування струмового захисту на аналізованій ділянці електричної мережі не є ефективним через низьку чутливість. Тобто класичний струмовий захист не буде сприймати коротке замикання в мережі як аварійний режим.

Рис. 7. характеризує ефективність використання дистанційного захисту (ДП) для розглянутої схеми. За результатами моделювання розраховували значення комплексних опорів, оцінювали в тому місці, де встановлювалася захист для кожного з експериментів, і розміщували на комплексній площині.

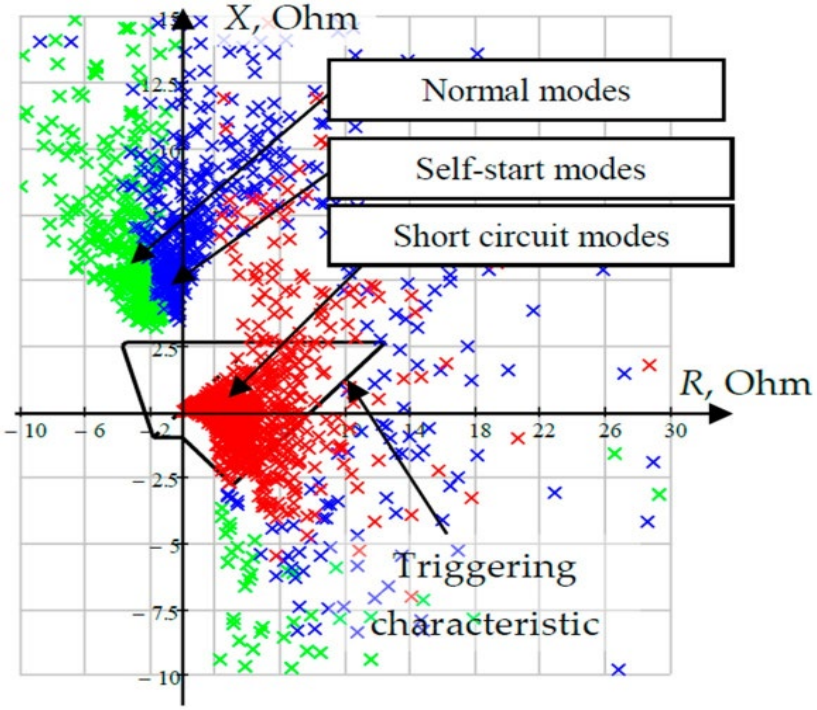

Рис. 7. Виконано багато комплексних вимірювань опору в аналізованих режимах [15].

Висновки по третьому розділу

Упровадження сучасної методики управління релейним захистом з використанням машинного навчання є необхідним кроком для забезпечення надійності енергетичних мереж. Алгоритми, засновані на штучному інтелекті, надають можливість оперативно виявляти потенційні відмови, аналізуючи

дані в реальному часі та прогнозуючи небезпечні ситуації. Це, у свою чергу, дозволяє вживати профілактичні заходи до виникнення серйозних проблем у роботі системи.

Застосування систем моніторингу, діагностики та навчання фахівців є критично важливим для підвищення ефективності релейного захисту. Інтеграція новітніх технологій та алгоритмів машинного навчання сприяє створенню стійкої енергетичної інфраструктури, яка здатна реагувати на зміни в умовах зовнішнього середовища, знижуючи ризики відмов.

Дослідження можливостей класифікаційних алгоритмів машинного навчання у релейному захисті відкриває нові горизонти для підвищення безпеки електропостачання, але вимагає системного підходу до їх впровадження. Справжня ефективність цих технологій залежить від глибокого розуміння різноманітних режимів роботи систем та особливостей електричних мереж. З огляду на результати моделювання аварійних режимів, необхідно враховувати їх специфіку для досягнення оптимальної чутливості систем захисту.

Отже, впровадження машинного навчання у сфері релейного захисту демонструє значний потенціал для покращення функціонування енергетичних систем, проте вимагає комплексного аналізу та продуманого підходу до реалізації.

РОЗДІЛ 4
МЕТОДИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Подальше підвищення впізнаваної здатності захисту може бути досягнуто в результаті використання розпізнавальних елементів на основі алгоритмів машинного навчання.

4.1 Метод K-найближчих сусідів

Цифровий релейний захист відіграє ключову роль у забезпеченні надійності та безпеки електричних систем. З урахуванням зростаючої складності енергетичних мереж та необхідності оперативного реагування на різні надзвичайні ситуації, підходи, що використовують методи машинного навчання, стають особливо актуальними. Одним із таких методів є K-найближчих сусідів (KNN), який демонструє високу ефективність у задачах класифікації та регресії.

Метод KNN базується на принципі локальності, відповідно до якого клас об'єкта визначається на основі класів його найближчих сусідів у багатовимірному просторі ознак. Це робить KNN простим і інтуїтивно зрозумілим інструментом для обробки даних, отриманих від захисних пристроїв. У контексті цифрового релейного захисту KNN може бути використаний для виявлення аномалій у роботі обладнання, класифікації типів несправності та прогнозування питань надійності[27].

Процес навчання з використанням KNN включає попереднє накопичення даних про робочі характеристики пристрою та його стан у різних умовах. Завдання полягає в тому, щоб допомогти системі розпізнавати патерни, що свідчать про потенційні несправності. Вибір параметра K, що відповідає за кількість сусідів, є критично важливим, оскільки він впливає на стабільність і точність моделі. Низькі значення K можуть призвести до перенавчання, тоді як занадто великі значення можуть призвести до узагальнення, ігноруючи важливі деталі.

Однією з переваг методу K-найближчих сусідів є його висока інтерпретованість. Спеціалісти можуть легко аналізувати, на основі яких

факторів система прийшла до того чи іншого рішення. Тим не менш, слід враховувати й обмеження KNN, такі як його чутливість до викидів і необхідність у значних обчислювальних ресурсах при великому обсязі даних.

В результаті, метод K-найближчих сусідів є потужним інструментом для навчання та вдосконалення цифрового релейного захисту, що дозволяє значно підвищити рівень надійності та безпеки електричних систем. Однак успішна реалізація вимагає уважного підходу до вибору параметрів і попередньої обробки даних. Використання KNN у цій галузі відкриває нові перспективи для покращення оперативної ефективності та зниження ризиків у функціонуванні енергетичної інфраструктури[16].

4. 2 Метод логістичної регресії

В умовах сучасного енергетичного ринку, де надійність та ефективність електричних мереж стають ключовими аспектами, важливо впроваджувати інноваційні рішення для забезпечення їх стабільної роботи. Одним з таких рішень є використання методів машинного навчання, зокрема логістичної регресії, для навчання цифрового релейного захисту.

Логістична регресія є статистичним методом, що дозволяє моделювати ймовірність виникнення певних подій, базуючись на сукупності незалежних змінних. У контексті цифрового релейного захисту вона має на меті ідентифікацію та класифікацію небезпечних ситуацій, таких як перевантаження і коротке замикання, на основі даних, отриманих з електричних мереж.

Застосування логістичної регресії в релейному захисті включає кілька етапів. Перш за все, необхідно зібрати великий обсяг історичних даних, що містять інформацію про роботу мережі, умови експлуатації, а також випадки аварій. На основі цього датасету моделі логістичної регресії можуть бути навчені на визначення зв’язку між характеристиками мережі і ймовірністю виникнення аварійних ситуацій.

Другим етапом є верифікація моделі. Це важливий етап, оскільки точність передбачень безпосередньо вплине на надійність релейного захисту.

Проводячи тестування на окремих вибірках даних, можна оцінити ефективність моделі та внести необхідні корективи.

У результаті, впровадження методу логістичної регресії в системи цифрового релейного захисту дозволить підвищити їх ефективність, швидкість реагування на небезпечні ситуації, а також зменшити ймовірність помилок, що можуть призвести до значних збитків.

Отже, метод логістичної регресії є перспективним інструментом для удосконалення цифрового релейного захисту, що сприяє забезпеченню більшої безпеки та стабільності електричних мереж. Це важливий крок на шляху до автоматизації та оптимізації процесів у енергетичному секторі[17].

4.3 Метод опорних векторів (SVM)

Один з перспективних методів для класифікації лінійних даних — це метод опорних векторів (SVM). У своїй найпростішій формі цей метод використовується для розпізнавання двох класів. Подібно до методу логістичної регресії, процедура навчання для реалізації релейного захисту полягає в проведенні гіперплощини у просторі ознак, яка відокремлює елементи навчальної вибірки, що належать до різних класів, розділяючи простір ознак на зони спрацьовування та неспрацьовування релейного захисту та захисних пристроїв. Таким чином, процедура класифікації поточного режиму полягає у визначенні, з якого боку від роздільної гіперплощини знаходиться відображення даного режиму у вибраному просторі ознак. [30]

Метод опорних векторів був розроблений у 1990-х роках і став одним з основних інструментів у сфері машинного навчання. Його основною метою є пошук оптимальної гіперплощини, що найкраще розділяє різні класи даних. В контексті цифрового релейного захисту, SVM може бути застосований для класифікації різноманітних сигналів, отримуваних з електричних систем, та виявлення аномалій, таких як короткі замикання або перевантаження.

Перш ніж вжити SVM у релейному захисті, слід провести підготовку даних. Це включає збір і обробку вхідних даних, таких як електричні струми і напруги, а також їх відповідні характеристики в різних режимах роботи. Для

досягнення високої точності результатів навчання важливо підібрати адекватні параметри моделі SVM, включаючи вибір ядра, що відповідає характеру даних. Наприклад, використання радіально-базисного ядра може бути ефективним для нелінійних розв'язаних задач.

Однією з переваг SVM є його здатність працювати із неявно рідкими даними, що дає змогу зменшити ризик переобучення моделі. Це важливо в контексті релейного захисту, оскільки наявність обмежених даних про рідкісні аварійні ситуації може ускладнити навчання моделей. SVM дозволяє ефективно працювати з таким рідкісним набором даних, адаптуючи модель до умов реальної експлуатації.

Проте, незважаючи на численні переваги, метод опорних векторів має й деякі обмеження. Наприклад, висока обчислювальна складність при обробці великих обсягів даних може стати на заваді його використанню. Також вибір ядра та його параметрів вимагає глибоких знань і експериментів для досягнення оптимальних результатів.

Підсумовуючи, метод опорних векторів є потужним інструментом для навчання цифрового релейного захисту. Його здатність до класифікації складних сигналів і виявлення аномалій робить його корисним у діяльності енергетичних компаній. Залежно від специфіки застосування, SVM може бути інтегровано в існуючі системи релейного захисту для підвищення їхньої ефективності та надійності. Подальші дослідження в цій галузі можуть призвести до нових досягнень та вдосконалення методів захисту в електричних мережах.

4.4 Евристичні методи оптимізації

Сучасні технології в електроенергетиці забезпечують підвищення надійності та ефективності роботи електричних мереж. У цьому контексті цифровий релейний захист (ЦРЗ) виступає ключовим елементом, відповідальним за безпечну та стабільну експлуатацію енергетичних систем. Однак якість роботи ЦРЗ значною мірою залежить від правильного налаштування та оптимізації його алгоритмів. З метою покращення цих

процесів важливо розглянути евристичні методи оптимізації, які можуть здійснити суттєвий внесок у навчання та вдосконалення цифрових релейних захистів.

Евристичні методи оптимізації представляють собою підхід, спрямований на знаходження достатньо хороших, але не завжди ідеальних рішень задачі, через що вони широко використовуються у складних системах, де традиційні методи можуть бути неефективними. Ці методи включають в себе алгоритми, такі як генетичні, стимуляційні annealing, алгоритми роїв часток та багато інших. Особливість цих алгоритмів полягає в їхній спроможності адаптуватися до зміни умов і знаходити оптимальні рішення за менший час, що є критично важливим у динамічному середовищі електричних мереж.

Наприклад, застосування генетичних алгоритмів для налаштування параметрів релейного захисту дозволяє ефективно експериментувати з різними комбінаціями параметрів. Цей підхід базується на принципах природного відбору, дають кращі рішення, що забезпечують максимальну надійність захисту, підлягають "розмноженню" та "мутації", що дозволяє здійснювати ітераційний процес вдосконалення.

Також варто зауважити, що стимуляційні annealing, яке використовує концепцію термодинаміки, може бути корисним у ситуаціях, коли параметри зберігають велику кількість місцевих екстремумів. Цей підхід дозволяє уникнути зависання у субоптимальних рішеннях, що часто відбувається при класичних методах оптимізації.

Не менш важливим є аспект навчання. Використання евристичних методів для навчання алгоритмів релейного захисту дозволяє здійснювати оптимізацію не лише параметрів, але й самих алгоритмів прийняття рішень. Інтеграція машинного навчання в евристичні методи дозволяє створювати адаптивні системи, які вчаться на основі попередніх даних про аварійні ситуації та адаптуються до нових умов у мережах.

Однак, слід зазначити, що незважаючи на численні переваги, використання евристичних методів при оптимізації цифрового релейного захисту потребує ретельного підходу до вибору параметрів та контролю якості. Надмірна налаштування або неправильна реалізація алгоритмів можуть призвести до неочікуваних наслідків, які, в свою чергу, можуть негативно вплинути на роботу електричних систем.

У підсумку, евристичні методи оптимізації є потужним інструментом для навчання цифрового релейного захисту, здатним підвищити його ефективність та надійність. З використанням цих методів електроенергетичні компанії можуть істотно поліпшити процеси налаштування релейного захисту, забезпечуючи безперебійну роботу своїх систем в умовах постійних змін та викликів. Перспективи подальшого розвитку даних методів відкривають нові можливості для удосконалення технологій управління та захисту енергетичних мереж.

4.5 Статистичні моделі оптимізації

Однією з важливих переваг статистичних моделей є їх здатність аналізувати великий обсяг даних, які надходять із різноманітних сенсорів та релейних пристроїв. Це дозволяє виявити закономірності у функціонуванні обладнання, а також протидіяти можливим аваріям. Статистичні моделі, такі як регресійний аналіз, методи кластеризації та машинне навчання, можуть бути використані для створення ефективних алгоритмів, що дозволяють прогнозувати стан системи на основі історичних даних.

Оптимізація в навчанні цифрового релейного захисту передбачає не лише покращення алгоритмів реагування на аварійні ситуації, але й забезпечення балансування між швидкістю реагування та точністю в машинному навчанні. Статистичні моделі можуть бути адаптовані для розробки рішень, що враховують специфіку роботи конкретних об'єктів енергетичної інфраструктури, забезпечуючи тим самим індивідуальний підхід до кожного проекту.

Не менш важливою є задача ідентифікації та класифікації елементів, що потребують захисту. Статистичні методи, такі як дерева рішень та нейронні мережі, забезпечують можливість автоматизації процесів навчання, що значно підвищує ефективність використання цифрових систем релейного захисту. Використання цих моделей дозволяє реалізувати алгоритми, які миттєво реагують на зміни в електричній мережі, зменшуючи ризик пошкодження обладнання та збитків, пов'язаних з аварійними ситуаціями.

Паралельно з цим важливо зазначити, що для ефективної реалізації статистичних моделей оптимізації в навчанні цифрового релейного захисту необхідно забезпечити інтеграцію цих технологій з існуючими системами управління. Це потребує розробки міждисциплінарних підходів, які б поєднували знання з електротехніки, комп'ютерних наук і статистики.

Таким чином, статистичні моделі оптимізації є невід'ємною частиною сучасного цифрового релейного захисту. Їхнє використання дозволяє досягти високих показників надійності, швидкості реагування та ефективності в управлінні енергетичними системами. У перспективі, зі збільшенням обсягів даних та удосконаленням алгоритмів машинного навчання, ми можемо очікувати появу ще більш ефективних рішень у цій важливій сфері[18].

Висновки по четвертому розділу

У сучасному світі енергетики цифровому релейному захисту (ЦРЗ) відводиться ключова роль у забезпеченні надійності та безпеки електросистем. Розвиток технологій у сфері машинного навчання відкриває нові горизонти для оптимізації роботи реле, дозволяючи створювати більш інтелектуальні та адаптивні системи захисту. В розділі розглянути основні методи і моделі машинного навчання це:

- K-Nearest Neighbors (KNN) : Ефективний для виявлення аномалій і класифікації несправностей в електричних системах; базується на локальних шаблонах і вимагає ретельного вибору параметрів.
- Логістична регресія : моделює ймовірність небезпечних ситуацій; підвищує швидкість реакції та зменшує помилки релейного захисту.

– Support Vector Machines (SVM) : класифікує сигнали та виявляє аномалії; вимагає підготовки даних і налаштування параметрів для оптимальної продуктивності.

– Евристична оптимізація : покращує ефективність алгоритму релейного захисту; пристосовується до мінливих умов.

– Статистичні моделі : аналізує великі обсяги даних для прогнозованого обслуговування та підвищення надійності системи.

Застосування сучасних машинних методів і моделей у сфері цифрового релейного захисту значно покращує ефективність і надійність роботи електросистем. Використання різноманітних підходів до машинного навчання, відкриває нові можливості для забезпечення стабільності та безпеки енергетичних об'єктів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто сучасні системи діагностики релейного захисту які відіграють ключову роль у забезпеченні надійності та безпеки електроенергетичних систем. З розвитком технологій та збільшенням вимог до якості обслуговування, діагностика релейного захисту набуває нових форм і методів. У роботі розглядаються приклади найбільш ефективних систем діагностики, що застосовуються сьогодні.

Першим прикладом є система моніторингу на основі цифрових реле, які здатні не лише виконувати функції захисту, але й збирати дані про працездатність обладнання. Такі системи, як правило, використовують алгоритми машинного навчання для аналізу великих обсягів інформації, що дозволяє виявляти потенційні несправності до їх виникнення. Наприклад, впровадження цифрових реле в розподільних мережах суттєво підвищило рівень автоматизації та передбачуваності обслуговування.

Ще одним важливим аспектом є використання технологій розподіленого моніторингу, таких як системи SCADA. Ці системи забезпечують централізований збір даних від безлічі об'єктів, що дозволяє операторам в реальному часі відстежувати стан обладнання та оперативно реагувати на виникнення аварійних ситуацій. Це значно скорочує час на діагностику та підвищує ефективність вирішення проблем.

Розвиток технологій у сфері машинного навчання відкриває нові горизонти для оптимізації роботи реле, дозволяючи створювати більш інтелектуальні та адаптивні системи захисту. В роботі розглянути основні методи і моделі машинного навчання:

1. K-Nearest Neighbors (KNN): Ефективний для виявлення аномалій і класифікації несправностей в електричних системах; базується на локальних шаблонах і вимагає ретельного вибору параметрів.
2. Логістична регресія: моделює ймовірність небезпечних ситуацій; підвищує швидкість реакції та зменшує помилки релейного захисту.
3. Support Vector Machines (SVM) : класифікує сигнали та виявляє аномалії;

вимагає підготовки даних і налаштування параметрів для оптимальної продуктивності.

4. Евристична оптимізація: покращує ефективність алгоритму релейного захисту; пристосовується до мінливих умов.

5. Статистичні моделі: аналізує великі обсяги даних для прогнозованого обслуговування та підвищення надійності системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Johns A.T., Salmon SK., Digital protection for power systems, IEE Power Series No.15, London 1995.
2. Ungrad H., Winkler W., Wiszniewski A., Protection Techniques in Electrical Energy Systems, Marcel Dekker, Inc., New York, 1995.
3. WG H-2 of IEEE Power System Relaying Committee, “A survey of optical channels for protective relaying practices and experience”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.2, April 1995, pp.647-658.
4. Wilson R.E., “An investigation of time transfer accuracies over a utility microwave communications channel”, IEIEE Transactiuons on Power Delivery, Vol.& No.3, July 1993, pp.993-999.
5. WG H-7 of IEEE Power System Relaying Committee, “Synchronized sampling and phasor measurements for relaying and control”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.9, No.1, January 1994, pp.4412-452.
6. https://uk.wikipedia.org/wiki/SCADA#
7. Використання HMI/SCADA-системи в енергетиці https://www.svaltera.ua/catalogs/knowledge base/brands/copa_data/zenon_in_energy.pdf
8. Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J. The Elements of Statistica l Learning, 2nd ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2001; p. 745.
9. Duda, R.O.; Hart, P.E. Pattern Classification and Scene Analysis, 1st ed.; Wiley: New York, NY, USA, 1973; p. 512.
10. Loskutov, A.A.; Pelevin, P.S.; Vukolov, V.Y. Improving the recognitio of operating modes in intelligent electrical networks based on machine learning methods. In Proceedings of the E3S Web of Conferences, Kazan, Russia, 21–25 September 2020; Volume 216, p. 1034.
11. Hasan, A.N.; Pouabe, P.S.; Twala, B. The Use of Machine Learning Techniques to Classify Power Transmission Line Fault Types and Locations. In Proceedings of the International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Fundata, Brasov, Romania, 25–27 May 2017; pp. 221–226.

12. Witten, I.H.; Frank, E. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, 2nd ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2005; p. 525.

13. Michie, D.; Spiegelhalter, D.; Taylor, C. Machine Learning, Neural and Statistical Classification; Ellis Horwood: Bromley, UK, 1994;p. 290.

14. Bishop, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning; Springer: Amsterdam, The Netherlands, 2006; p. 738.

15. Kulikov, A.L.; Bezdushniy, D.I.; Osokin, V.Y.; Sevostyanov, A.A. K-Nearest Neighbors Algorithm Application in the Electrical Grid States Recognition Problems. In Proceedings of the E3S Web of Conferences, Kazan, Russian, 21–25 September 2020; Volume

16. Метод k-найближчих сусідів https://uk.wikipedia.org/wiki/%

17. Метод логістичної регресії https://uk.wikipedia.org/wiki

18. «Моделювання та оптимізація технічних систем та процесів», «Теорія технічних систем» https://zp.edu.ua/sites/ default/files/konf/ modelyrovanye19_0.pdf