

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

бакалавр

на тему: «Розробка мікропроцесорного релейного захисту лінії
електропередач 110 кВ»

КРБ.14ЕЕбд_41.04.00.00.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
*«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*
спеціальності 141
*«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*
ступеня вищої освіти *бакалавр*
групи *141ЕЕбд_41*
ГАСЕНКО Євгеній

Керівник: канд. фіз.-мат. наук, доцент
СЕМЕНОВ Анатолій

Полтава – 2025 року

ЗМІСТ

РЕФЕРАТ	3
ЗМІСТ	6
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ	10
1.1 Призначення та вимоги до релейного захисту в системах електропостачання	10
1.2 Переваги та застосування мікропроцесорних пристроїв у сучасних системах РЗА	12
Висновки до розділу 1	14
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ 110 КВ	15
2.1 Об'єкт дослідження	15
2.2 Вибір пристроїв релейного захисту та лінійної автоматики	16
Висновки до розділу 2	19
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ, ПРИНЦИПУ ДІЇ ТА РОЗРАХУНКІВ УСТАВОК ЗАХИСТУ ДФЗ-201	20
3.1 Конструкція та функціонування захисту типу ДФЗ-201	20
3.2 Принцип дії та робота схеми захисту в умовах коротких замикань	21
3.3 Технічні характеристики захисного пристрою	23
3.4 Розрахунок уставок та органів відключення захисту ДФЗ-201	26
Висновки до розділу 3	30
РОЗДІЛ 4 ФУНКЦІОНАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО МОДУЛЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ	31

4.1 Призначення, умови експлуатації та функціональні особливості	31
4.2 Основні технічні параметри та характеристики	33
4.3 Функціональні характеристики пристрою	37
Висновки до розділу 4	44
5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ	45
5.1 Фактори виробничого середовища та заходи з охорони праці	45
5.2 Заходи з безпеки персоналу та охорони навколишнього середовища в енергетиці	48
5.3 Техніко-економічне порівняння електромеханічного та мікропроцесорного релейного захисту	52
Висновки до розділу 5	55
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	56
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	58

ВСТУП

Функціонування систем електропостачання в умовах сучасного міського, промислового та аграрного середовища неможливе без використання автоматизованих засобів керування, що забезпечують стабільну роботу як у штатних, так і в аварійних режимах. У зв'язку з постійним розвитком автоматизованих технологій удосконалюються як методи керування, так і технічна база пристроїв автоматики.

Останні роки характеризуються підвищеними вимогами до надійності та якості електропостачання, що зумовлює необхідність впровадження централізованих автоматизованих систем керування із застосуванням засобів телемеханіки та сучасних обчислювальних технологій.

Мікропроцесорні пристрої нового покоління мають розширену функціональність, високу надійність та суттєві переваги у порівнянні з традиційними електромеханічними реле. До основних їхніх переваг належать:

- зручність технічного обслуговування;
- програмовані логічні функції, що дозволяють адаптувати пристрій до конкретних умов;
- керування параметрами захисту безпосередньо з терміналу;
- візуалізація основних показників на вбудованому дисплеї;
- запам'ятовування та реєстрація подій;
- зручний доступ до налаштувань через інтерфейс "людина-машина".

У проєкті основним захистом обрана система ДФЗ-201, що реалізує диференційно-фазний принцип захисту на високих частотах. Як резервний пристрій використовується мікропроцесорний блок «Діамант», який окрім захисних функцій забезпечує реєстрацію подій та виконання функцій лінійної автоматики. Цей пристрій також підтримує дистанційне керування окремими елементами захисту, що дає змогу реалізувати ефективний контроль та моніторинг.

Мета роботи - підвищення надійності, швидкодії та селективності захисту ліній електропередачі 110 кВ шляхом розробки й впровадження

мікропроцесорного релейного захисту з сучасними функціями діагностики, автоматики та дистанційного керування.

Об'єкт розробки - лінія електропередачі 110 кВ, інтегрована до мережі північної частини м. Харкова, зокрема підстанція 110/10/6 кВ «Перемога» та суміжні вузли енергосистеми.

Предмет розробки - алгоритми роботи, конструктивна побудова та технічні характеристики мікропроцесорного пристрою релейного захисту типу ДФЗ-201 та ПМ РЗА, що реалізують диференційно-фазний і дистанційний захист ЛЕП.

Методика досліджень. У роботі застосовано: моделювання електричних режимів роботи мережі 110 кВ з використанням ПЗ V-VI-50; розрахунок струмів короткого замикання та опорів елементів мережі; обґрунтування уставок пускових та відключаючих органів захисту; аналіз функціональних можливостей мікропроцесорних пристроїв захисту на основі нормативної документації та технічних паспортів обладнання.

Для вирішення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі: проаналізувати сучасний стан релейного захисту в енергосистемах та тенденції його розвитку; провести дослідження режимів роботи електричної мережі 110 кВ північної частини м. Харкова; обґрунтувати вибір мікропроцесорних пристроїв захисту для конкретної ділянки мережі; дослідити принцип дії та конструктивні особливості пристрою ДФЗ-201; виконати розрахунок уставок захисту та органів відключення; проаналізувати функціональні можливості програмно-технічного модуля релейного захисту ПМ РЗА; розробити рекомендації щодо інтеграції сучасних систем захисту в реальні енергетичні об'єкти.

Практична значимість та реалізація досліджень. Результати роботи можуть бути використані при модернізації діючих систем релейного захисту ЛЕП 110 кВ, зокрема в проектах технічного переоснащення підстанцій. Розрахунки, проведені в роботі, дозволяють обґрунтовано підбирати уставки захисту відповідно до реальних умов мережі. Запропоноване технічне рішення сприяє підвищенню безпеки, зменшенню часу ліквідації аварій та зниженню експлуатаційних витрат завдяки впровадженню мікропроцесорних технологій.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Призначення та вимоги до релейного захисту в системах електропостачання

Релейний захист і автоматика (РЗА) є невід'ємними складовими надійного функціонування електроенергетичних систем, адже вони забезпечують виявлення та локалізацію аварійних і ненормальних режимів роботи окремих елементів мережі з метою запобігання розвитку системних аварій.

Основним завданням РЗА є швидке й надійне відключення пошкодженого об'єкта або його частини від енергосистеми, щоб не допустити поширення порушення на інші, справні елементи. До таких об'єктів належать генератори, силові трансформатори, лінії електропередач різного класу напруги, секції шин, навантаження тощо.

Згідно з вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС) [1, 2], усі елементи силового електроустановлення електростанцій, підстанцій та розподільчих мереж повинні бути захищені від внутрішніх пошкоджень (наприклад, коротких замикань) і зовнішніх ненормальних режимів (перевантажень, обриву фаз, зниження напруги тощо). У жодному разі обладнання не може залишатись без захисного покриття, незалежно від режиму його експлуатації.

Системи РЗА повинні відповідати таким базовим технічним вимогам:

- Швидкодія. Пристрої повинні забезпечити мінімально можливий час реакції на коротке замикання або іншу аварійну ситуацію, щоб обмежити зону пошкодження та зберегти стабільність роботи решти енергосистеми (ПУЕ 3.2.4).
- Селективність. При пошкодженні одного з елементів мережі повинно бути відключено тільки його, а не вся ділянка або суміжні неушкоджені елементи. Неселективна дія допускається лише у випадку подальшого

відновлення електропостачання за допомогою автоматичного повторного вмикання (АПВ) або автоматичного вводу резерву (АВР) (ПУЕ 3.2.5).

- Надійність. Захист має спрацювати лише за умов реальної необхідності та залишатись неактивним у штатних режимах. Для підвищення надійності в системі використовуються як ближнє, так і далеке резервування (ПУЕ 3.2.7).

- Чутливість. Пристрої мають реагувати навіть на найменші значення струмів короткого замикання в межах своєї зони дії. Оцінка чутливості проводиться шляхом обчислення коефіцієнта чутливості:

$$K_{\text{ч}} = I_{\text{кз хв.}} / I_{\text{с.з.}}$$

де $I_{\text{кз хв.}}$ – мінімальний струм короткого замикання на межі зони дії захисту,
 $I_{\text{с.з.}}$ – струм спрацювання захисту.

Забезпечення наведених вимог можливе завдяки широкому використанню сучасних мікропроцесорних технологій та гнучких алгоритмів автоматизації (рис. 1.1). У зв'язку з цим пристрої РЗА поділяють на низку функціональних груп залежно від їх призначення.

Примітка: кожна з цих груп пристроїв може реалізовуватись як за допомогою традиційних електромеханічних, так і сучасних цифрових (мікропроцесорних) пристроїв.

1.2 Переваги та застосування мікропроцесорних пристроїв у сучасних системах РЗА

У зв'язку з динамічним розвитком інформаційних технологій та зростанням вимог до надійності і гнучкості систем електропостачання, мікропроцесорні пристрої релейного захисту (МП РЗА) набули широкого впровадження в електроенергетичній галузі. Ці пристрої активно застосовуються у мережах різного класу напруги — від розподільчих (6–10 кВ) до магістральних

(110–750 кВ), що обумовлено їх універсальністю, високою функціональністю та компактністю.

Мікропроцесорні пристрої, порівняно з електромеханічними та напівпровідниковими аналогами, забезпечують реалізацію цілого комплексу функцій в одному корпусі: від основного захисту до функцій автоматики, фіксації та аналізу аварійних подій, дистанційного керування, телеметрії та комунікації із зовнішніми системами через протоколи SCADA, IEC 61850 або Modbus.

Основні переваги мікропроцесорних пристроїв у системах РЗА:

- Гнучкість та адаптивність. Програмована логіка дозволяє реалізовувати захисти за складними алгоритмами, які важко або неможливо втілити на класичних пристроях. Зокрема, підтримуються адаптивні уставки, логіка логічних матриць, інтелектуальні режими реагування на зміни параметрів мережі.
- Висока швидкодія. Завдяки цифровій обробці сигналів і оптимізації алгоритмів селективності забезпечується значне скорочення часу спрацювання захисту, що особливо важливо при ліквідації коротких замикань у високовольтних мережах.
- Вбудована система самодіагностики. Постійний контроль працездатності внутрішніх вузлів пристрою дозволяє своєчасно виявити несправності без очікування періодичних регламентів технічного обслуговування.
- Зниження енергоспоживання. Завдяки використанню цифрових технологій споживання енергії з оперативних та вимірювальних ланцюгів суттєво зменшується. Це дає можливість використовувати менш габаритні струмо- та напругоперетворювачі (наприклад, оптичні трансформатори).
- Точність і документування подій. При виникненні аварій зберігаються точні значення струмів, напруг, фаз, часу спрацювання, що дозволяє проводити післяаварійний аналіз і коректно локалізувати зону пошкодження.

- Зручний інтерфейс керування. МП РЗА оснащуються інтуїтивними інтерфейсами типу «людина-машина» (НМІ), які дозволяють оперативно змінювати уставки, переглядати журнали подій, вести моніторинг стану та взаємодіяти з мережею Ethernet, GSM або оптоволоконними каналами.

- Інтеграція в АСУ ТП. Завдяки підтримці стандартних протоколів обміну даними мікропроцесорні пристрої безперешкодно інтегруються в автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСУ ТП) або SCADA, виконуючи функції телеуправління, телесигналізації та телевимірювання, що значно покращує координацію між усіма рівнями системи електропостачання.

Приклад впровадження: ПС 110/10/6 кВ «Перемога» (м. Харків)

Показовим прикладом застосування мікропроцесорного захисту є проєкт нової вузлової підстанції 110/10/6 кВ «Перемога» у північній частині м. Харкова. Ця підстанція проєктується для покриття зростаючого електричного навантаження в районах Павлове Поле та Олексіївка.

У складі підстанції передбачено: відкритий розподільчий пристрій 110 кВ (ОРУ) за схемою «дві робочі та обхідна системи шин»; два триобмоточні силові трансформатори потужністю по 25 МВА з відношенням напруг 110/10/6 кВ; закриті розподільчі пристрої 6 кВ і 10 кВ із вакуумними вимикачами у секціонованій схемі шин; комплекс мікропроцесорного релейного захисту на всіх рівнях напруги з можливістю інтеграції в загальноміську систему диспетчерського управління.

Реалізація такого підходу дозволить підвищити не тільки надійність та безперебійність електропостачання, але й значно скоротити витрати на технічне обслуговування та модернізацію в подальшому.

Висновки до розділу 1

У результаті аналізу призначення, вимог та сучасного стану розвитку релейного захисту й автоматики в системах електропостачання можна зробити такі висновки:

Релейний захист та автоматика (РЗА) є критично важливими елементами електроенергетичних систем, що забезпечують надійне виявлення та ліквідацію аварійних і ненормальних режимів, запобігаючи поширенню пошкоджень і забезпечуючи стійкість роботи енергосистеми.

Відповідно до вимог ПУЕ та ПТТЕС, всі елементи силового електрообладнання мають бути захищені від коротких замикань та відхилень від нормального режиму, а пристрої РЗА повинні забезпечувати швидкодію, селективність, надійність і чутливість.

Забезпечення високих вимог до ефективності захисту стало можливим завдяки застосуванню мікропроцесорних пристроїв, які об'єднують в собі широкий спектр функцій – від реалізації складних алгоритмів захисту до телеметрії, телеуправління і самодіагностики.

Сучасні мікропроцесорні РЗА вирізняються високою точністю, гнучкістю налаштувань, компактністю, зниженим енергоспоживанням і здатністю до інтеграції в автоматизовані системи керування (АСУ ТП, SCADA), що дозволяє підвищити рівень автоматизації в енергосистемах.

Застосування цифрових пристроїв РЗА дає змогу ефективно аналізувати аварійні події, швидко ідентифікувати місце пошкодження, зменшити потребу в обслуговуванні та підвищити загальну надійність енергопостачання.

Практичне впровадження сучасних систем релейного захисту на прикладі проекту ПС «Перемога» демонструє можливість побудови високоефективного вузла електропостачання з використанням новітніх технологій РЗА, що є прикладом інтеграції класичної енергетики з цифровими рішеннями.

РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ТА ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ 110 КВ

2.1 Об'єкт дослідження

У рамках даної роботи об'єктом дослідження є фрагмент електричної мережі 110 кВ північної частини міста Харкова, в який інтегрується нова підстанція 110/10/6 кВ «Перемога». Для перевірки надійності та ефективності функціонування цієї мережі в умовах нормальних та післяаварійних режимів, було виконано серію розрахунків режимів роботи, що включали оцінку струморозподілу та рівнів напруги при різних варіантах конфігурацій і топологій мережі.

Аналіз нормального режиму засвідчив, що найбільш доцільним є функціонування шин 110 кВ підстанції «Перемога» у замкнутій схемі, із секціонуванням шин на суміжних підстанціях — «Олексіївка» та «Сокольники». У деяких варіантах зростають перетоки потужності до граничних значень, особливо по напрямках Іванівка – П. Поле та Залютіно – Іванівка, що вимагає оперативного керування вимикачами для забезпечення допустимого навантаження ліній.

При моделюванні аварійних ситуацій (відключення окремих або парних ліній електропередач) були зафіксовані сценарії, коли потоки потужності перевищують допустимі значення. Це стосується, зокрема, режимів:

- Відключення ПЛ Іванівка – Перемога або Іванівка – П. Поле;
- Втрати двоцепного заходу на підстанцію «Перемога»;
- Відключення ЛЕП Залютіно – Іванівка та Барабашове – Нагірне.

Для забезпечення стабільності в мережі при такому розвитку подій необхідне секціонування шин, включення або виключення секційних вимикачів, а в окремих випадках — обмеження споживання електроенергії в північних районах міста до 40%.

Крім того, розглянуто перспективу підключення потужної підстанції 330/110 кВ «Північна», що має значний вплив на розподіл навантаження. За

результатами розрахунків струморозподілу та напруг у мережі, підтверджено доцільність побудови додаткової лінії від ПС «Залютіно» для зниження перевантажень та підвищення надійності живлення. В усіх розглянутих конфігураціях рівні напруги залишаються в допустимих межах, однак за умови введення ПС «Північна» рекомендується встановлення батарей статичних конденсаторів на шинах 110 кВ для підтримки напруги.

Також було виконано розрахунок струмів короткого замикання з урахуванням та без урахування нової ПС 330/110 кВ «Північна». Дані розрахунків, наведені в таблиці 2.1, демонструють незначне зниження рівнів струмів КЗ при підключенні нової підстанції, що пояснюється зміною топології та секціонуванням мережі, спрямованим на формування керованих потоків потужності в північному регіоні Харкова.

2.2 Вибір пристроїв релейного захисту та лінійної автоматики

Забезпечення надійної та ефективної роботи електроенергетичних систем вимагає впровадження сучасних технічних рішень, зокрема систем релейного захисту та лінійної автоматики (РЗА). З огляду на зростання вимог до швидкодії, селективності, чутливості та надійності захисту, ключовим є правильний вибір технічних засобів, які дозволяють своєчасно виявляти пошкодження, локалізувати аварійні ділянки та мінімізувати вплив відмов на загальну роботу мережі. Особливу актуальність це має для мереж напругою 110 кВ, де навіть короточасні порушення можуть призвести до масштабних наслідків.

Загальні принципи вибору РЗА та технічні вимоги

Процес вибору пристроїв РЗА регламентується вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), стандартами галузі, рекомендаціями виробників обладнання та результатами розрахункових сценаріїв роботи мережі. Основними критеріями вибору виступають:

- Швидкодія — максимально короткий час спрацювання захисту у разі короткого замикання дозволяє уникнути розвитку аварійного стану та забезпечити стабільність роботи всієї енергосистеми;

- селективність — відключення тільки ушкодженої ділянки мережі без порушення роботи суміжних елементів;
- чутливість — здатність реагувати навіть на незначні перевищення допустимих параметрів струму або напруги, зокрема у віддалених точках зони дії;
- надійність — безвідмовність роботи пристрою у реальних експлуатаційних умовах, виключення хибних спрацьовувань;
- резервування — наявність як основного, так і додаткового (резервного) захисту, який виконує роль дублюючого при відмові основного;
- документування подій — ведення журналу подій, реєстрація струмів, напруг, часу спрацювання та аналіз післяаварійних ситуацій.

Додатково при виборі обладнання враховується відповідність класу точності трансформаторів струму та напруги, можливість роботи у мережах з глухозаземленою нейтраллю, ступінь впливу температурних чинників, підтримка функцій телеметрії, телеуправління та синхронізації у рамках SCADA або АСУ ТП.

Впровадження мікропроцесорних пристроїв у системах РЗА

Мікропроцесорні пристрої релейного захисту стали основою сучасного підходу до організації автоматичного реагування на пошкодження в мережах середньої та високої напруги. Завдяки цифровим алгоритмам аналізу сигналів, ці пристрої дозволяють реалізовувати складні логічні схеми захисту, адаптивне налаштування, гнучку координацію між рівнями автоматики та дистанційний контроль параметрів.

Типовий набір функцій мікропроцесорних пристроїв включає:

- чотиріступінчастий дистанційний захист з напрямковими органами;
- захист нульової послідовності (від замикань на землю);
- струмова відсічка та максимальний струмовий захист;
- автоматичне повторне вмикання (АПВ) з контролем синхронізму;
- пристрої резервного вимикання вимикачів (ПРВВ);
- облік спрацювань та сигналізація несправностей.

Переваги мікропроцесорних систем:

- інтеграція в локальні та централізовані системи моніторингу (АСУ ТП);
- багаторівневий самоконтроль і діагностика;
- можливість дистанційного керування та зміни уставок;
- мінімальні витрати на технічне обслуговування.

Практичне впровадження РЗА на ПС "Перемога"

У проєкті побудови підстанції 110/10/6 кВ "Перемога" в м. Харкові передбачено комплексне використання мікропроцесорних і електромеханічних пристроїв РЗА. Основу системи складають пристрої "Діамант" і ДФЗ-201, які взаємодіють з існуючим обладнанням (ЭПЗ-1636, ПЗ-233, БЗ-255-77).

Ключові технічні рішення включають: встановлення основного високочастотного диференційно-фазного захисту ДФЗ-201 на чотирьох ПЛ 110 кВ; використання "Діамант" як резервного захисту з повним набором функцій (дистанційний захист, АПВ, ПРВВ); розширення функціоналу шинного та обхідного захисту за рахунок комбінованого використання пристроїв "Діамант" і ЭПЗ-1636; організація диференційного захисту трансформаторів із використанням "Діамант"; реалізація локальних систем обліку та реєстрації подій через реєстратори "Рекон" для обладнання на електромеханічній базі; впровадження автоматизованих робочих місць (АРМ) на ПС "Перемога" для оперативного моніторингу.

Завдяки впровадженню сучасного комплексу РЗА, забезпечується координація між підстанціями Іванівка, ХФТИ, Сокольники, П. Поле, Нагірна та диспетчерським пунктом АК "Харківобленерго". Всі дані передаються по захищених каналах зв'язку, що дозволяє оперативно реагувати на зміну стану мережі та мінімізувати наслідки аварійних ситуацій.

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено комплексне дослідження функціонування електричної мережі 110 кВ північної частини м. Харкова в умовах інтеграції нової підстанції 110/10/6 кВ «Перемога». За результатами аналізу режимів роботи встановлено, що найбільш ефективною є схема з замкнутим режимом шин ПС «Перемога» та секціонуванням суміжних підстанцій. Моделювання аварійних ситуацій дозволило виявити критичні сценарії з перевантаженням окремих ліній, що потребує гнучкого управління вимикачами, секціонування та в ряді випадків — обмеження навантаження.

Розрахунок короткозамикальних струмів підтвердив доцільність підключення ПС 330/110 кВ «Північна», оскільки це дозволяє знизити рівень струмів КЗ та оптимізувати потоки потужності. Рекомендовано також встановлення батарей статичних конденсаторів для стабілізації напруги в мережі.

Виконано обґрунтований вибір пристроїв релейного захисту та лінійної автоматики відповідно до технічних вимог ПУЕ. Показано переваги впровадження мікропроцесорних пристроїв, зокрема типу «Діамант», які забезпечують високу точність, гнучке налаштування, дистанційний контроль та реєстрацію подій. Реалізація комплексної системи РЗА на базі мікропроцесорних та електромеханічних засобів дозволяє забезпечити надійний захист ліній, трансформаторів і шин, а також створює передумови для цифровізації управління підстанціями.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ, ПРИНЦИПУ ДІЇ ТА РОЗРАХУНКІВ УСТАВОК ЗАХИСТУ ДФЗ-201

3.1 Конструкція та функціонування захисту типу ДФЗ-201

Захисна панель типу ДФЗ-201 реалізує функцію диференційно-фазного високочастотного захисту та призначена для застосування як основний захист повітряних ліній електропередач напругою до 220 кВ і більше. Система відзначається високою швидкодією, реагує на всі типи коротких замикань і не спрацьовує при коливаннях параметрів у мережі. Виготовлення виконується у кліматичному виконанні "У" або "Т" згідно з ДСТ 15150-69, залежно від умов експлуатації: від -20 до +40 °С для помірного клімату та від -10 до +45 °С для тропічного. Модифікація для тропіків має індекс "Т" — ДФЗ-201-Т.

Захист працює у зв'язці з високочастотними прийомопередавачами типу УПЗ-70 або ПВЗД-МТ. У комплект постачання входить релейна частина — панель ДФЗ-201 з передбаченим місцем для встановлення прийомопередавача та з прокладеним з'єднанням до схем захисту.

Конструктивне виконання панелі

Панель складається з металевої рами, на якій змонтовано два комплекти апаратів із релейною частиною, захищених оболонками. Оболонки мають ступінь захисту IP40, клемники — IP00. Кожен елемент схеми має буквено-цифрове позначення, що вказує на комплект, до якого він належить. Таблички на передній панелі і позначення на звороті дозволяють ідентифікувати всі компоненти та з'єднання. Сполучні дроти маркуються відповідно до номерів апаратів і клем.

На панелі розміщено вісім випробувальних блоків типу 6-БИ – 13-БИ, через які підключаються кола струму та напруги, кола управління й сигнальні з'єднання з прийомопередавачем. Три блоки (10-БИ, 11-БИ, 12-БИ) використовуються для переведення захисту на обхідний вимикач при обслуговуванні основного.

Функціональні вузли захисту

Пусковий орган складається з реле: поляризованих (1-1ПР, 1-2ПР), струмових (1-1РТ, 1-2РТ), опору (1-РС), та допоміжних. Реле 1-1ПР може реагувати як на струми зворотної, так і нульової послідовностей, а реле 1-1РТ — на фазний струм. У разі виявлення несиметрії, запускається передавач, а реле 1-2ПР та 1-2РТ блокують схему, якщо коротке замикання відбувається поза захищеною зоною. Використання трансформаторів із насиченням і фільтрів з конденсаторами забезпечує чутливість та зменшення впливу гармонік.

Орган маніпуляції ВЧ-сигналом включає фільтр струмів прямої та зворотної послідовностей $I_1 + KI_2$, стабілізатори напруги й проміжні трансформатори. Вибір параметрів фільтра та навантаження дозволяє узгодити опори, а змінюваний коефіцієнт "К" — адаптувати режим спрацьовування залежно від умов мережі.

Орган порівняння струмів визначає фазове співвідношення струмів на обох кінцях лінії та складається з основного (реле 2-4ПР, трансформатор 2-ТЕ) і допоміжного (реле 3-ПР, трансформатор 2-ТС) блоків. У нормальному режимі активним є допоміжний орган. При надходженні ВЧ-сигналу спрацьовує перемикач на основний. Захист реагує лише при виникненні внутрішнього пошкодження. Уставки змінюються шляхом перемикачів резисторів у колі гальмівної обмотки.

Таким чином, захист типу ДФЗ-201 є надійним рішенням для повітряних ліній високої напруги, забезпечуючи швидке реагування, чутливість до внутрішніх замикань, селективність та стійкість до нестабільних режимів.

3.2 Принцип дії та робота схеми захисту в умовах коротких замикань

Система захисту однієї повітряної лінії складається з двох релейних панелей і комплекту високочастотного обладнання, розміщених на протилежних кінцях захищеної ділянки. Основний принцип базується на аналізі зсуву фаз між струмами, що надходять з обох кінців лінії. Ці струми формуються комбінованими фільтрами типу $I_1 + KI_2$ та передаються через лінію у вигляді високочастотних імпульсів.

Пусковий орган, виявивши порушення, запускає передавач і активує орган порівняння, який через фазовий аналіз визначає місце пошкодження. При внутрішньому короткому замиканні фази пакетів збігаються, що призводить до спрацювання захисту, а при зовнішньому — імпульси зсунуті на півперіод, і система блокується. Уставка на спрацювання визначається струмом реле 2-4ПР та залежить від кута зсуву фаз.

У разі несиметричних КЗ пуск здійснюється поляризованими реле. При безінерційному пуску передавач активується одразу при появі струму. Контакти реле підготовлюють ланцюги вимкнення, але захист не активується через отримання високочастотного сигналу із зсувом фази близько 180° , який блокує систему. Повернення до нормального стану після ліквідації КЗ відбувається по ланцюгах вимкнення миттєво, а по пускових — із витримкою часу 0,5–0,6 с.

Через відсутність струмів зворотної послідовності, пуск реалізується фіксацією попередньої несиметрії та роботою реле опору. Захист спрацює на короткий час, контроль сигналів триває до повернення пускових реле у вихідне положення. Контакти реле перешкоджають помилковому повторному спрацюванню. Якщо струм достатній, то пуск здійснюється і через реле струму, що забезпечує чітку реакцію навіть при значному небалансі.

Пусковий алгоритм аналогічний описаним вище режимам, але в цьому випадку завдяки паузам у прийомі ВЧ-сигналів реле 2-4ПР спрацює і ініціює вимкнення. Спрацює реле 2-7РП, яке зупиняє передавач до моменту відкриття вимикача.

При зниженні напруги активується реле опору 1-РС. Система блокує чутливий пусковий канал, запобігаючи помилковому вимкненню. При невеликих навантаженнях реле може не активуватись, що зберігає роботу захисту, а вибірковість забезпечується комбінацією контактів реле опору та струму.

Для забезпечення надійної роботи під час обслуговування передбачено переведення захисту на резервний (обхідний) вимикач. Це реалізується через перемикання робочих кришок між випробувальними блоками (6-БИ, 7-БИ, 8-БИ і 10-БИ – 12-БИ), через які заведено всі необхідні ланцюги — змінного та

постійного струму, АПВ, блокування і сигналізації. Це забезпечує повноцінне дублювання функціонування захисту на період виведення основного вимикача в реві

3.3 Технічні характеристики захисного пристрою

Номінальні параметри

- Змінний струм: 1 або 5 А; напруга: 100 В; частота: 50 Гц;
- Постійний струм: 110 або 220 В;
- Струм утримування вихідного реле 2-6РП: 1, 2 або 4 А.

Споживання потужності в стандартному режимі

- По ланцюгах струму змінного струму: до 25 ВА на фазу без проміжного трансформатора і до 50 ВА з ним;
- По ланцюгах напруги змінного струму ($U_n = 100$ В): до 25 ВА на фазу;
- По ланцюгах постійного струму: до 30 Вт при номінальній напрузі (без урахування приймально-передавального модуля).

У нормальному режимі апаратура витримує навантаження до 110% номінальних параметрів струму та напруги без перевищення температурних меж для ізоляції.

Регулювання чутливості пускових органів

- Струми спрацювання по зворотній послідовності: 1; 1,5; 2 А $\pm 10\%$;
- По потроєному струму нульової послідовності: 1; 1,5; 2 А $\pm 15\%$;
- Температурна стабільність струму спрацювання: $\pm 7\%$ в температурному діапазоні $-20 \dots +40$ °С.

Реле 1-1ПР у 2 рази чутливіше, ніж 1-2ПР. Існує можливість додаткового підвищення уставки для 1-2ПР шляхом заміни резисторів у гальмівній обмотці.

Коефіцієнти повернення

- Для реле 1-2ПР: $\geq 0,6$; для 1-1ПР: 0,45–0,6;
- Зазори між контактами: не менше 0,4 мм.

Параметри направленої реле опору (1-РС)

- Характеристика: колова, зміщена у 3-й квадрант;
- Струм спрацювання при $U_p = 0$: 3,5 А;
- Кут максимальної чутливості: $70 \pm 5^\circ$;
- Температурне відхилення: $-8 \dots +4^\circ$;
- Точність роботи: не більше 2,8 А при 90% уставки;
- Мінімальна уставка опору: 3,5 Ом/фаза.

Налаштування здійснюється зміною трансформації автотрансформатора за допомогою перемикання накладок. Розрахунок уставки проводиться за формулою:

$$N = (z_{\min} / z_{уст}) \times 100$$

де $z_{\min} = 3,5$ Ом/фаза, а $z_{уст}$ – необхідна уставка.

Комбінований фільтр струмів (коефіцієнт "К")

- Значення: 4; 6; $8 \pm 8\%$ при $I = 3$ А;
- Зміна "К" в діапазоні 3–50 А: $\pm 20\%$;
- Температурна стабільність: $\pm 7\%$;
- Перемикання уставки – механічне (накладки).

Вихідна напруга маніпулятора при $K=8$

- Мінімум 8 В при струмі прямої послідовності 2 А.

Кутова характеристика вихідної напруги маніпулятора

- Кут між ІВС = 3 А і вихідною напругою: 24° ($K=4$), 20° ($K=6$), 17° ($K=8$) $\pm 5^\circ$;
- В межах ІВС = 3 ± 35 А: відхилення $-10 \dots +3^\circ$.

Кути блокування захисту уставки: $\pm 45^\circ$, $\pm 52^\circ$, $\pm 60^\circ \pm 15\%$.

Параметри реле органів порівняння

- Реле 2-4ПР: коефіцієнт повернення $\geq 0,6$;
- Реле 2-3ПР: коефіцієнт повернення $0,45-0,6$;
- Зазори між контактами: $\geq 0,4$ мм.

Часові характеристики проміжних реле наведені в таблиці 3.1.

Швидкодія захисту

- При безінерційному пуску: $\leq 0,05$ с;
- При контактному пуску: $\leq 0,085$ с;
- Додаткове зростання часу при несприятливому моменті: $\leq 0,015$ с.

Характеристики проміжних трансформаторів струму наведені в таблиці 3.2.

Вимоги до ізоляції

Опір ізоляції між ланцюгами та корпусом: ≥ 5 МОм при 20 ± 5 °С, відносній вологості $\leq 80\%$;

Випробувальна напруга: 1500 В між частинами та корпусом; 1000 В – між обмотками трансформаторів однієї котушки.

Гарантійні умови експлуатації

Промислове виконання - 2,5 роки з дати встановлення, не більше 3 років з моменту відвантаження; експортне/тропічне виконання: 1 рік з пуску або 2 роки з моменту перетину кордону; якщо з моменту виготовлення до експорту пройшло понад 6 місяців - гарантія зменшується відповідно.

3.4 Розрахунок уставок та органів відключення захисту ДФЗ-201

Для виконання розрахунків струмів короткого замикання застосовано спеціалізовану програму V-VI-50, створену в Інституті електродинаміки НАН України.

Для запуску програми необхідно сформувані електричну схему заміщення, яка включає параметри електричних опорів ліній, трансформаторів та джерел живлення. В процесі розрахунку визначаються опори прямої та нульової послідовностей.

Визначення опорів повітряних ліній

а) Опір прямої послідовності розраховується за формулою:

$$x_{np} = x_{num} \cdot l, \quad (3.1)$$

де $x_{нит}$ – середній питомий індуктивний опір, приймається 0,4 Ом/км; L – довжина лінії.

Виконано розрахунок індуктивного опору прямої послідовності для кожної з ділянок лінії (результати подано окремо).

б) Опір нульової послідовності визначається як:

$$x_0 = 3 \cdot x, \quad (3.2)$$

де x – опір прямої послідовності для відповідної лінії.

Обчислення опорів трансформаторів

Використовується наступна формула:

$$x = \frac{x_T\%}{100} \cdot \frac{S_B^2}{S_{ном}} \quad (3.3)$$

де $S_{ном}$ – номінальна потужність трансформатора (МВА), $S_{баз}$ – базова потужність (МВА), x_T – приведений опір трансформатора на основі напруги короткого замикання.

Для трансформаторів з трьома обмотками застосовуються додаткові формули:

$$\begin{aligned} x_{ТВ}\% &= 0,5(U_{KB-H}\% + U_{KB-C}\% - U_{KC-H}\%) \\ x_{TC}\% &= 0,5(U_{KB-C}\% + U_{KC-H}\% - U_{KB-H}\%) \\ x_{TH}\% &= 0,5(U_{KB-H}\% + U_{KC-H}\% - U_{KB-C}\%) \end{aligned} \quad (3.4)$$

а) ПС "Іванівка": трансформатори ТДТН, $S_{ном} = 40$ МВА, $U_K\% = 10,75/6,75$.

Розрахунок з урахуванням чотирьох паралельно підключених агрегатів.

б) ПС "Перемога": трансформатори ТДТН, $S_{ном} = 25$ МВА, $U_K\% = 10,5$.

в) ПС "Павловська": трансформатори ТДН, $S_{ном} = 10$ МВА, $U_K\% = 10,5$.

г) ПС "Сокольники": трансформатори ТД, $S_{ном} = 32$ МВА, $U_K\% = 10,5$.

Розрахунок параметрів пускових органів для симетричних КЗ

Приклад: лінія 110 кВ Іванівка – Перемога, точки встановлення захисту – ПС "Іванівка" і ПС "Перемога".

а) Коефіцієнти трансформації:

- ПС Іванівка: ТТ – 600/5, ТН – 1100;
- ПС Перемога: ТТ – 600/5, ТН – 1100.

б) Робочі параметри:

- $I_{\text{макс}} = 510 \text{ А};$
- $\varphi_{\text{н}} = 35^\circ;$

в) Мінімальний опір:

$$Z_{\text{мін}} = (U_{\text{ном}}^2) / (3 \times I_{\text{макс}}^2), \quad (3.5)$$

де $U_{\text{ном}} = 110 \text{ кВ}.$

Визначення відстроювання пускового струмового органа

$$I_{\text{відст}} = k_{\text{н}} \times k_{\text{в}} \times I_{\text{роб}}, \quad (3.6)$$

де $k_{\text{н}} = 1,1$ – коефіцієнт надійності, $k_{\text{в}} = 0,85$ – коефіцієнт повернення.

Розраховано $I_{\text{відст}}$ для ПС "Іванівка" та "Перемога".

Уставка струмового органа на відключення

а) Чутливість визначається як:

$$I_{\text{с.з}} \geq I_{\text{відст}} \times k_{\text{н}} \times k_{\text{відг}}, \quad (3.7)$$

де $k_{\text{відг}} \geq 1$, $k_{\text{надійності}} = 1,4$.

б) Урахування додаткових умов не здійснюється через відсутність відгалужень.

Прийняті значення $I_{\text{с.з}}$ для обох підстанцій.

Перевірка чутливості відключаючого органа

$$C = I_{\text{к.з}} / I_{\text{с.з}}, \quad (3.8)$$

де $I_{к.з}$ – струм короткого замикання. Умова чутливості: $C > 2$ – дотримано.

Уставка опору для відключаючого органа

а) Мінімальна уставка реле опору:

$$Z_{уст} \geq Z_{min}, \quad (3.9)$$

де $Z_{min} = 3,5$ Ом/фаза.

Розраховані значення для ПС "Іванівка" та "Перемога".

Визначення необхідної відбудови від робочого опору

$$Z_{уст} \geq Z_{min} \times k_p \times \cos(\varphi_{м.ч}) / \cos(\varphi_n), \quad (3.10)$$

де $k_p = 1,2$ – коефіцієнт резерву, $\varphi_{м.ч}$ – максимально чутливий кут.

Оскільки відгалужень немає, додаткові перевірки не проводились.
Прийнята уставка $Z_{уст} = 32$ Ом для обох підстанцій.

Загальний висновок: обрані уставки та параметри забезпечують надійну та селективну роботу захисту при симетричних коротких замиканнях у відповідності до нормативних вимог.

Висновки до розділу 3

Захист ДФЗ-201 є високоефективним засобом для реалізації диференційно-фазного високочастотного захисту повітряних ліній напругою до 220 кВ. Його застосування забезпечує оперативне виявлення коротких замикань з високою чутливістю та селективністю.

Пристрій має модульну конструкцію з чіткою ідентифікацією елементів, що полегшує обслуговування, модернізацію та перевірку функціональних вузлів.

Функціональна схема захисту базується на аналізі фазових зсувів між струмами з обох кінців лінії, дозволяючи точно визначати місце виникнення аварії та уникати помилкових спрацювань при коливаннях у мережі.

Захист демонструє ефективну роботу як при симетричних, так і при несиметричних коротких замиканнях, включаючи режими з передачею та блокуванням високочастотного сигналу. Завдяки поляризованим реле та фільтрам забезпечується стійкість до дії гармонік і знижених напруг.

Технічні характеристики пристрою відповідають сучасним вимогам: підтримується широкий температурний діапазон, висока швидкодія, гнучкість налаштувань та надійність ізоляції.

Проведені розрахунки уставок пускових і відключаючих органів засвідчили відповідність пристрою вимогам до чутливості, надійності та селективності. Прийняті уставки забезпечують спрацювання захисту у разі внутрішніх пошкоджень та його блокування при зовнішніх аваріях.

Таким чином, захист типу ДФЗ-201 є технічно досконалим, функціонально гнучким і експлуатаційно надійним рішенням для захисту ліній електропередач високої напруги в сучасних енергосистемах.

РОЗДІЛ 4 ФУНКЦІОНАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНОГО МОДУЛЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ

4.1 Призначення, умови експлуатації та функціональні особливості

Програмно-технічний модуль релейного захисту та автоматики (ПМ РЗА) призначений для використання в електричних мережах змінного струму з частотою 50 Гц як мікропроцесорний пристрій, що виконує функції захисту, протиаварійної автоматики, діагностики, реєстрації подій і керування вимикачами.

Застосування ПМ РЗА можливе на об'єктах електроенергетики різних рівнів – підстанціях та електростанціях (ТЕС, АЕС, ГЕС), як діючих, так і тих, що перебувають у стадії будівництва, з рівнем напруги від 6 до 500 кВ. Пристрій може бути інтегрований до АСУ як підсистема нижнього рівня, встановлюючись у щитовому або шафовому виконанні.

ПМ РЗА є багатофункціональним мікропроцесорним пристроєм, який об'єднує в собі функції захисту, автоматичного керування, контролю, локального та дистанційного управління. Його алгоритми та інтерфейси розроблені з урахуванням сумісності з існуючими системами, що спрощує інтеграцію і експлуатацію.

Основні функціональні можливості ПМ РЗА:

- реалізація захисних функцій, автоматики та керування;
- управління високовольтними вимикачами;
- програмне конфігурування захисту та автоматики без виведення пристрою з експлуатації;
- робота з двома групами уставок, що можна змінювати локально або дистанційно;
- контроль та відображення поточних параметрів мережі;
- зберігання та реєстрація аварійних параметрів (до 5 аварій та 150 подій);
- фіксація КЗ-струмів та напруг;

- облік електроенергії за приєднанням;
- контроль справності вимикачів та їхніх керувальних ланцюгів;
- постійна самодіагностика з індикацією несправностей;
- блокування вихідних сигналів у разі виявлення несправностей;
- світлодіодна індикація роботи функцій захисту, наявності напруги, несправностей;
- підтримка інтерфейсів RS-232, RS-485 для обміну з АСУ або ПЕОМ;
- високий рівень електричної ізоляції входів/виходів;
- гальванічна розв'язка всіх каналів, включаючи живлення, що забезпечує перешкодозахищеність.

Для кожного з двох приєднань ПМ РЗА виконує такі функції.

а) Захист:

- чотириступеневий дистанційний захист від усіх видів КЗ;
 - направлений максимальний струмовий захист;
 - міжфазна струмова відсічка;
 - захист від однофазних замикань на землю.
- б) Автоматика:
- ПРВВ (передача резерву власних потреб);
 - АПВ (автоматичне повторне вмикання).
- в) Інші функції:
- визначення виду та типу короткого замикання;
 - локалізація місця пошкодження;
 - контроль ланцюгів напруги;
 - діагностика керувальних ланцюгів вимикача;
 - запис аварійних подій (режим цифрового реєстратора);
 - осцилографування аналогових сигналів.

ПМ РЗА проводить аналіз електричних параметрів аналогових сигналів, визначаючи напруги, частоту, активну та реактивну потужності та енергію. В алгоритмах обробки реалізовані компенсація аперіодичної складової та фільтрація гармонік. Для розрахунків і відображення використовуються діючі значення першої гармоніки, приведені до вторинних величин, які також відображаються на вбудованому індикаторі пристрою.

4.2 Основні технічні параметри та характеристики

Технічні характеристики пристрою мікропроцесорного релейного захисту й автоматики (ПМ РЗА) узгоджуються з вимогами, наведеними в таблицях 4.1–4.5.

Примітка: інтервал контролю – 0,5–1 с.

Додаткові технічні особливості:

Типова схема зовнішніх підключень ПМ РЗА наведена на рисунку 4.1.

- ПМ РЗА не виходить з ладу при відключенні живлення або його поновленні, а також при коротких замиканнях на землю в ланцюгах оперативного струму.

- Опір ізоляції між незалежними електричними колами або до корпусу (в холодному стані) становить: ≥ 40 МОм (звичайні умови), ≥ 10 МОм (висока температура), ≥ 2 МОм (висока вологість).

Витримка напруги ізоляції для зовнішніх кіл (100–250 В) – 1000 ± 50 В (1 хв., 50 Гц), для струмових ланцюгів різних фаз – 1500 ± 75 В (1 хв., 50 Гц).

- Пристрій оснащений годинником реального часу з індикацією дати та часу.
- Параметри настроювання, аварійні записи та конфігурації зберігаються:
 - при наявності живлення — необмежено;
 - при його відсутності — до 3 років завдяки батареї TL-5242.
- Похибка при зміні частоти вхідного сигналу в межах 45–55 Гц становить $\leq 0,5\%$ на 1 Гц.

4.3 Функціональні характеристики пристрою

Дистанційний захист (ДЗ) виконує роль основного селективного захисту лінії від міжфазних коротких замикань. Для виявлення міжфазних пошкоджень у якості пускових елементів використовуються комплексні опори Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} , що розраховуються на основі лінійних напруг (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}) і відповідних струмів (I_{AB} , I_{BC} , I_{CA}):

$$Z_{AB} = U_{AB} / I_{AB} = Z_{1K} = Z_{1УД} \cdot LK$$

$$Z_{BC} = U_{BC} / I_{BC} = Z_{1K} = Z_{1УД} \cdot LK$$

$$Z_{CA} = U_{CA} / I_{CA} = Z_{1K} = Z_{1УД} \cdot LK$$

У пристрої серії «Діамант» реалізовано чотириступеневу систему дистанційного захисту. Геометрія зон дії може бути представлена у вигляді кругів або секторів на комплексній площині з координатами активного та реактивного опору. Конфігурація кожної зони налаштовується за п'ятьма параметрами: координати центра, радіус, а також кути початку й завершення сектора дії.

На рисунку 4.2 подано приклад розміщення зон дії захисту.

Реалізовані можливості:

- окреме налаштування часу спрацювання для кожного ступеня;
- вибір між ручним і автоматичним прискоренням;
- автоматичне блокування за відсутності вимірюваної напруги.

Захист струмовим відсіченням

Міжфазна струмова відсічка забезпечує швидкодіюче виявлення міжфазних коротких замикань. Реалізується з можливістю роботи як на відключення, так і на подачу сигналу, з відповідною затримкою у часі.

Максимальний струмовий захист

Цей тип захисту виступає як резервний при міжфазних коротких замиканнях. Доступна настройка на роботу "на сигнал" або "на відключення", активація напрямленого режиму, а також автоматичне прискорення. Напрямок дії визначається за фазовим зсувом між струмами та напругами відповідних фаз.

Функція виявляє однофазні замикання на землю у захищеному сегменті. Пусковий орган реагує на перевищення порога напруги $3U_0$, встановленого уставкою.

Контроль цілісності вимірювальних кіл напруги

Для контролю використовуються фазні напруги з обмоток ТН, з'єднаних "зіркою" та "розімкнутим трикутником". При виявленні обриву, автоматично блокується ДЗ та напрямлений МСЗ.

Ідентифікація типу КЗ і визначення місця пошкодження

Тип короткого замикання визначається за співвідношенням фазних струмів і струму нульової послідовності. Для оцінки місця пошкодження використовується баланс реактивної потужності прямої та зворотної послідовностей.

Автоматичне повторне включення (АПВ)

АПВ активується при вимкненні вимикача, незалежно від причини. Підтримується вибір умов пуску, а також кілька варіантів контролю: за напругою, синхронізмом, або без нього. Також є перелік ситуацій, коли АПВ забороняється.

Резервування відмови вимикача (ПРВВ)

Функція активується, коли власні захисти подають команду на відключення, але вимикач не спрацьовує. Реєстрація подій базується на відсутності зміни струму та сигналів стану (рис. 4.3).

Керування високовольтним вимикачем

Команди на відключення або включення подаються як вручну, так і автоматично (напр., через АПВ). Підтримується контроль виконання команд за станом контактів і струмами. Присутні запобіжники від багаторазового увімкнення під час аварій. На рисунку 4.4 зображено функціональну схему керування ВВ. Параметри контролю включення ВВ вручну наведені в таблиці 4.14.

Висновки до розділу 4

Програмно-технічний модуль релейного захисту та автоматики (ПМ РЗА) є універсальним і багатофункціональним пристроєм, призначеним для забезпечення комплексного захисту, керування, контролю, діагностики та реєстрації подій в електричних мережах змінного струму з частотою 50 Гц.

Пристрій застосовується в широкому діапазоні напруг (від 6 до 500 кВ) і може бути ефективно використаний на підстанціях, ТЕС, АЕС та ГЕС, у складі автоматизованих систем управління, з можливістю інтеграції в існуючу інфраструктуру.

Технічні характеристики ПМ РЗА відповідають сучасним вимогам до точності вимірювання, стійкості до зовнішніх впливів, електробезпеки та енергоефективності. Аналогові та дискретні входи/виходи забезпечують надійний контроль і гнучке налаштування.

Пристрій реалізує повний комплекс захисних функцій: чотириступеневий дистанційний захист, максимальний струмовий захист, захист від міжфазних КЗ і однофазних замикань на землю, а також функції автоматики, такі як АПВ і ПРВВ.

ПМ РЗА здатен визначати тип короткого замикання та локалізувати місце пошкодження, що значно прискорює аварійно-відновлювальні роботи та підвищує оперативність персоналу.

Пристрій має функції контролю ланцюгів напруги, діагностики ланцюгів управління вимикачем, осцилографування аналогових сигналів та цифрової реєстрації аварій, що сприяє глибокому аналізу аварійних ситуацій.

Завдяки можливості конфігурування без зупинки пристрою, підтримці двох груп уставок, збереженню параметрів навіть при зникненні живлення та наявності інтерфейсів зв'язку з АСУ, ПМ РЗА забезпечує гнучке й ефективне управління електроустановками різного призначення.

РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ

5.1 Фактори виробничого середовища та заходи з охорони праці

Охорона праці – це комплексна система законодавчих, соціально-економічних, організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та профілактичних заходів, спрямованих на створення безпечних і здорових умов праці та збереження працездатності працівників. На виробництві можуть існувати чинники, що становлять потенційну небезпеку для здоров'я. Завдання охорони праці полягає у мінімізації ризику травматизму та профзахворювань, водночас забезпечуючи комфортні умови для ефективної діяльності.

Стандартизація є важливим інструментом у забезпеченні безпеки праці. Завдяки їй вдається підвищити технічний рівень рішень у сфері охорони праці та систематизувати нормативну документацію. Підвищення продуктивності досягається шляхом збереження здоров'я працівників, продовження тривалості активної праці, зменшення аварій та підвищення якості продукції.

На енергетичних об'єктах усі заходи з охорони праці повинні виконуватись відповідно до вимог Кодексу законів України про працю, Закону України "Про охорону праці" та інших чинних нормативних актів.

Мікрокліматичні умови

З урахуванням характеру роботи дослідника (категорія 1а — легкі фізичні навантаження, значне інтелектуальне напруження) відповідно до ДСТУ 12.1.005-88 визначаються оптимальні мікрокліматичні параметри: температура, вологість та швидкість руху повітря (табл. 5.1). Для підтримання необхідного клімату використовується централізована система опалення та кондиціонування (наприклад, кондиціонер типу БК-2000) згідно з СНиП 2.04.05-92.

Забезпечення таких умов не лише сприяє доброму самопочуттю персоналу, а й забезпечує надійну експлуатацію обладнання.

Таблиця 5.1 – Оптимальні мікрокліматичні параметри робочої зони

Освітлення

Освітлення в лабораторії здійснюється штучними джерелами світла відповідно до норм СНиП II-4-79. Параметри освітлення мають відповідати вимогам щодо зорових завдань, з урахуванням розміру об'єкта, контрасту та характеру фону (табл. 5.2).

Для природного освітлення застосовується коефіцієнт природної освітленості (КПО), який для Харкова (IV світловий пояс) розраховується за формулою:

$$e_n^{IV} = e_n^{III} \cdot m \cdot c$$

де $e_n^{IV} = 1,2 \%$, $m = 0,9$, $c = 0,95$. Таким чином, КПО = 1,026 %.

У лабораторії використовується загальне штучне освітлення згідно з вказаними нормативами.

Шумове навантаження

Рівень шуму, який створюється роботою кондиціонерів та освітлення, не перевищує 50 дБА. Це відповідає нормативам ДСТУ 12.1.003-83 і є прийнятним для дослідницької діяльності. Джерела вібрації у приміщенні відсутні.

На кожному робочому місці мають бути забезпечені умови, що відповідають чинним нормативним документам. Основні небезпечні й шкідливі фактори наведені у таблиці 5.3.

5.2 Заходи з безпеки персоналу та охорони навколишнього середовища в енергетиці

Електробезпека – сукупність організаційних і технічних засобів, спрямованих на захист працівників від ураження електричним струмом, електричними дугами, електромагнітними полями та статичною електрикою.

Проникнення струму в організм може призвести до серйозних наслідків: ураження внутрішніх органів, зупинки серця, опіків. Вплив струму залежить від його сили, частоти, тривалості, шляху проходження через тіло, стану організму, напруги, а також опору тіла (в нормі — 1000 Ом).

Коротка характеристика впливу змінного струму на людину:

- 0,5 мА – відчувається;
- 2–3 мА – біль;
- 15 мА – судоми;
- 20–50 мА – критично небезпечний;
- 100 мА – смертельний.

Найнебезпечнішим вважається змінний струм з частотою 50 Гц. Постійний струм небезпечніший щодо електролізу крові.

Захист від ураження забезпечується конструктивними, технічними та організаційними заходами, які враховують:

- тип і параметри електроустановки;
- спосіб заземлення;
- можливість зняття напруги;
- характер виконуваних робіт.

Комплексна реалізація вказаних заходів дозволяє знизити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій та забезпечити надійний захист персоналу.

Для гарантування електробезпеки в колах вторинних ланцюгів вимірювальних трансформаторів струму й напруги, що використовуються в схемах релейного захисту та автоматики, необхідно забезпечити їх надійне заземлення.

Заземленням у електротехніці називається навмисне електричне з'єднання будь-якої частини електроустановки з елементами заземлювальної системи з метою підтримання електричного потенціалу на безпечному рівні. Основні типи заземлення включають: робоче, захисне, блискавкозахисне.

У цьому випадку розглядається захисне заземлення, що застосовується для убезпечення персоналу, який обслуговує електроустановки. Його суть полягає у з'єднанні з заземленням металевих частин електрообладнання, які за нормальних

умов не є струмоведучими, але можуть потрапити під напругу через пошкодження ізоляції.

Для реалізації заземлення створюється спеціальний контур, що включає заземлювачі та провідники, які з'єднують елементи установки з ґрунтом.

З метою миттєвого усунення небезпеки ураження електрострумом під час появи напруги на металевих корпусах обладнання застосовується занулення — електричне з'єднання корпусів та інших відкритих металевих частин з нульовим захисним провідником, який забезпечує їх підключення до землі через систему електропостачання.

Заходи безпеки під час експлуатації електроустановок

Оперативне обслуговування електроустановок включає підтримання заданих режимів роботи, проведення перемикань, планові огляди, підготовку до технічного обслуговування та ремонту.

Обслуговувати електроустановки можуть лише особи, які пройшли відповідне навчання, засвоїли принципи роботи обладнання, ознайомлені з експлуатаційними інструкціями, схемами та мають відповідну кваліфікаційну групу. Для роботи з установками понад 1000 В персонал повинен мати IV групу електробезпеки, інші працівники — щонайменше III групу.

Проведення складних перемикань повинно виконуватись щонайменше двома особами: один — виконує дію, інший — контролює правильність і послідовність операцій. Черговий персонал оформлює відповідний перемикальний лист.

Огляд електрообладнання здійснюється візуально. Його може виконувати одна особа з групою електробезпеки не нижче III. Під час огляду заборонено виконувати будь-які ремонтні чи інші втручання.

Усі маніпуляції з запобіжниками дозволені лише при повному знятті напруги.

Види робіт за умовами електробезпеки поділяються на:

- виконання робіт під напругою або поблизу струмоведучих частин;
- роботи без зняття напруги на безпечній відстані від струмоведучих елементів;

- роботи із попереднім зняттям напруги.

Такі роботи проводяться на підставі письмового розпорядження або в рамках експлуатаційного регламенту.

Пожежна безпека

Організація пожежної безпеки на об'єктах енергетичної галузі повинна здійснюватись згідно з вимогами Закону України "Про пожежну безпеку", а також НАПБ А.01.001 та іншими чинними нормативами, які регламентують заходи щодо попередження й гасіння пожеж.

На кожному енергетичному підприємстві, залежно від рівня пожежної небезпеки, має бути організована служба пожежної безпеки або призначена особа, відповідальна за дотримання протипожежного режиму.

Будівництво та експлуатація об'єктів повинні відповідати встановленим протипожежним вимогам. Всі будівлі, споруди та прилеглі території мають бути обладнані відповідними системами виявлення та гасіння пожеж, внутрішнім і зовнішнім протипожежним водопостачанням, а також позначені відповідними знаками безпеки згідно з нормативними документами.

На об'єкті обов'язково запроваджується протипожежний режим, який встановлюється наказом керівника, а також розробляються та затверджуються інструкції з пожежної безпеки, що враховують специфіку об'єкта.

Для первинного гасіння пожеж в енергоустановках застосовуються вогнегасники таких типів:

- порошкові: ОП-2;
- газові (вуглекислотні): ОУ-2, ОУ-5.

Охорона навколишнього середовища

Енергетичні об'єкти чинять істотний вплив на довкілля внаслідок викидів шкідливих речовин у повітря, ґрунт і воду, теплового забруднення, а також значного споживання природних ресурсів — зокрема води та земель. До факторів екологічного навантаження також належать електромагнітні випромінювання від ліній електропередач і можливий радіаційний вплив, що негативно позначається на стані біосфери.

Ключовими джерелами техногенного навантаження є електростанції та об'єкти енергетичної інфраструктури — трансформаторні підстанції, повітряні та кабельні лінії. Вплив електричних мереж передусім пов'язаний з трансформацією ландшафту, зайняттям земель, порушенням природного середовища та створенням електричних і магнітних полів.

Проектування, будівництво, експлуатація, а також виведення з експлуатації енергетичних об'єктів мають здійснюватися відповідно до положень чинного екологічного законодавства України. Зокрема, це Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища", "Про охорону атмосферного повітря", "Про відходи", а також вимог Водного кодексу України та галузевих нормативних актів і стандартів у сфері охорони довкілля. [9]

Використання електроустановок, які не відповідають вимогам екологічної та санітарної безпеки, забороняється.

Під час експлуатації енергетичних установок слід дотримуватись затверджених обмежень щодо:

- обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферу;
- скидання шкідливих речовин у водойми;
- використання водних ресурсів і обсягів водовідведення;
- утворення, зберігання та утилізації відходів;
- рівнів шуму, вібрації, електричних і магнітних полів, що не повинні

перевищувати встановлених нормативів.

Забезпечення екологічної безпеки є обов'язковим на всіх етапах життєвого циклу енергооб'єкта – від вибору місця розміщення до його виведення з експлуатації.

5.3 Техніко-економічне порівняння електромеханічного та мікропроцесорного релейного захисту

У сучасних енергосистемах важливим аспектом забезпечення надійності та безпеки є вибір ефективного типу релейного захисту. Традиційно використовувані електромеханічні реле поступово замінюються

мікропроцесорними пристроями, що володіють розширеним функціоналом та кращими експлуатаційними характеристиками.

З метою обґрунтування доцільності впровадження мікропроцесорного релейного захисту (ПМ РЗА) у системі електропередачі 110 кВ було проведено техніко-економічне порівняння двох варіантів – традиційного електромеханічного реле та сучасного мікропроцесорного пристрою.

Порівняння проводилося за такими критеріями: функціональні можливості, точність спрацювання, час реакції, надійність, витрати на технічне обслуговування, вартість впровадження, енергоспоживання та габаритні розміри. Підсумкові дані наведено в таблиці 5.4.

Розрахунок терміну окупності

Розглянемо витрати протягом 5 років експлуатації (без урахування інфляції):

Електромеханічний захист:

- Початкова вартість: 15 000 грн
- Обслуговування: $3\,000 \times 5 = 15\,000$ грн
- Загальні витрати: 30 000 грн

Мікропроцесорний захист:

- Початкова вартість: 40 000 грн
- Обслуговування: $600 \times 5 = 3\,000$ грн
- Загальні витрати: 43 000 грн

Різниця у вартості за 5 років становить:

$$\Delta = 43\,000 - 30\,000 = 13\,000 \text{ грн}$$

Однак при використанні мікропроцесорного захисту додатково враховується зменшення витрат на:

- аварійні простої (до 10 000 грн/рік)
- втрати електроенергії через помилкові спрацювання ($\approx 5\,000$ грн/рік)

Сукупна економія:

$$(10\,000 + 5\,000) \times 5 \text{ років} = 75\,000 \text{ грн}$$

Чистий економічний ефект за 5 років:

$$75\,000 - 13\,000 = 62\,000 \text{ грн}$$

Термін окупності:

$$40000 \text{ грн} / (10000 + 5000 - (3000 - 600)) = 40000 / 12600 \approx 3,17 \text{ роки}$$

Проведене техніко-економічне порівняння показує, що незважаючи на вищу початкову вартість, мікропроцесорний релейний захист є економічно вигіднішим в середньостроковій перспективі. Термін його окупності становить приблизно 3 роки, після чого експлуатація забезпечує чистий фінансовий ефект. Крім того, підвищується рівень автоматизації, знижується ймовірність аварій, а інтеграція в SCADA дозволяє централізовано керувати системою електропостачання.

Висновки до розділу 5

У п'ятому розділі бакалаврської роботи проведено комплексну оцінку шкідливих і небезпечних факторів виробничого середовища, виявлено джерела впливу і встановлено відповідність їх параметрів чинним нормативам. Забезпечення нормативного мікроклімату, освітлення, рівня шуму та електромагнітної безпеки створює безпечні та комфортні умови для персоналу.

Розглянуто ключові вимоги щодо електробезпеки в енергетичних установках, обґрунтовано необхідність заземлення, занулення, дотримання правил виконання робіт під напругою і без неї. Описано кваліфікаційні вимоги до персоналу і регламент дій під час експлуатації та перемикань. Зазначено, що пожежна безпека в електроустановках досягається через застосування спеціалізованих вогнегасників, дотримання протипожежного режиму, наявність служб контролю та дотримання норм пожежної безпеки відповідно до законодавства. Доведено, що вплив енергетичних об'єктів на навколишнє середовище є суттєвим, а тому всі етапи експлуатації мають відповідати вимогам екологічного законодавства.

У результаті техніко-економічного порівняння встановлено, що мікропроцесорні релейні захисти мають значні переваги над електромеханічними аналогами: менший час спрацювання, більша точність, автоматичне самодіагностування, низьке енергоспоживання та мінімальні витрати на обслуговування. Розрахунки показали, що попри вищу вартість впровадження, мікропроцесорний захист окупається приблизно за 3 роки завдяки зниженню експлуатаційних витрат, зменшенню аварійних простоїв і втрат електроенергії. Запровадження мікропроцесорного захисту сприяє підвищенню надійності енергопостачання, полегшенню інтеграції в сучасні системи диспетчерського керування (SCADA) та є економічно доцільним з урахуванням перспективи довгострокової експлуатації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання бакалаврської роботи було досягнуто поставленої мети – розроблено техніко-обґрунтований проєкт мікропроцесорного релейного захисту для лінії електропередачі напругою 110 кВ.

Основні результати, отримані в ході дослідження, полягають у наступному:

1. Проведено аналіз сучасного стану електропередавальних систем та виявлено ключові недоліки традиційних електромеханічних реле, що не забезпечують необхідного рівня точності, швидкодії та надійності захисту.

2. Визначено функціональні вимоги до пристроїв релейного захисту в умовах експлуатації ліній 110 кВ, з урахуванням особливостей аварійних режимів, вимог селективності та надійного функціонування при коротких замиканнях та інших пошкодженнях.

3. Розроблено структуру мікропроцесорного релейного захисту, обґрунтовано вибір технічного обладнання з урахуванням параметрів лінії, захищеної ділянки, типових навантажень та системної інтеграції.

4. Визначено основні технічні характеристики та параметри роботи пристрою мікропроцесорного захисту, відповідно до діючих нормативних документів та стандартів галузі. Обрана модель ПМ РЗА характеризується наступними технічними параметрами: номінальний струм – 5 А, з робочим діапазоном до $30 I_n$; номінальна фазна напруга – 58 В, лінійна – 100 В; споживана потужність – 0,05 ВА (струм), 0,5 ВА (напруга); діапазон частоти – 50 Гц; клас точності спрацювання $\pm 1-3 \%$; час спрацювання 0,01–0,02 с; енергоспоживання – до 1 ВА; середній термін служби – 20 років.

5. Визначено вимоги до умов експлуатації пристрою, у тому числі до мікроклімату (температура 22–25 °С, вологість 40–60 %, швидкість повітря – 0,1 м/с), освітлення (300 лк), шуму (до 50 дБА), а також виконано оцінку відповідності нормативним документам щодо охорони праці, електробезпеки, пожежної та екологічної безпеки.

6. Забезпечення надійного заземлення вторинних кіл вимірювальних трансформаторів та організація оперативного обслуговування відповідно до вимог IV групи електробезпеки підвищують безпечність експлуатації системи.

7. Порівняльний аналіз із електромеханічними реле засвідчив, що мікропроцесорний пристрій є економічно доцільним: при вищій початковій вартості термін окупності становить $\approx 3,17$ року за рахунок зменшення витрат на обслуговування та запобігання аваріям.

8. Результати проєкту можуть бути використані на практиці для модернізації систем релейного захисту ліній електропередач, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців з електроенергетики, електротехніки та автоматизованого керування.

