

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота

на правах рукопису

УДК 621.359.4

Ступак Артем Андрійович.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз комп'ютерного релейного захисту трансформаторів,  
машин та шин

(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

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

Ступак А. А.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Яковенко В. А.

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

## АНОТАЦІЯ

**Ступак А.А.** Аналіз комп'ютерного релейного захисту трансформаторів, машин та шин. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Сучасні електроенергетичні системи, що характеризуються зростаючою складністю та потужністю, вимагають надійного та швидкого захисту їх критично важливих елементів, таких як трансформатори, генератори (машини) та збірні шини.

Проведено аналіз КРЗ трансформаторів, машин та шин. Він дозволяє оптимізувати роботу захисту, впроваджувати новітні технології та забезпечувати кібербезпеку критично важливого обладнання

**Ключові слова:** комп'ютерний релейний захист, трансформатори, генератори, шини, надійність і безперебійність електропостачання.

## ABSTRACT

Stupak A.A. Analysis of Computer-Based Relay Protection of Transformers, Machines, and Busbars. Qualification work for obtaining a Master's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2025.

Modern power systems, characterized by increasing complexity and power, require reliable and fast protection of their critical elements, such as transformers, generators (machines), and busbars.

An analysis of computer-based relay protection (CRP) of transformers, machines, and busbars has been conducted. It allows optimizing the operation of protection, implementing the latest technologies, and ensuring cybersecurity of critical equipment.

Keywords: computer-based relay protection, transformers, generators, busbars, reliability and continuity of power supply.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 КОМП'ЮТЕРНИЙ РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ: ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ	6
1.1 Розвиток комп'ютерного захисту	6
1.2 Історичний контекст	7
1.3 Очікувані вигоди комп'ютерного захисту	9
1.3.1 Вартість	9
1.3.2 Самодіагностика та надійність	10
1.3.3 Інтеграція системи та цифрове середовище	10
1.3.4 Функціональна гнучкість та адаптивний захист	11
Висновок по першому розділу	14
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ СКЛАДОВІ КОМП'ЮТЕРНИХ РЕЛЕ ТА ЇХ ПРИЗНАЧЕННЯ	15
2.1 Архітектура комп'ютерних реле	15
2.2 Аналогова схема входу	16
Висновки по другому розділу	21
3 РОЗДІЛ КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ, МАШИН ТА ШИН	22
3.1 Основні положення	22
3.2 Алгоритми захисту силових трансформаторів.	23
3.3 Захист двигуна	33
3.4 Цифровий захист шин	35
Висновок по третьому розділу	42
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	44

## ВСТУП

Комп'ютерний релейний захист, що базується на використанні мікропроцесорних систем, значно трансформував традиційні методи захисту електроенергетичних систем. Він пропонує низку важливих переваг, але також має певні недоліки, які необхідно враховувати при його впровадженні.

Переваги комп'ютерного релейного захисту включають підвищену точність та швидкість спрацювання. Використання цифрових алгоритмів дозволяє більш точно аналізувати сигнали та швидко реагувати на виникнення аварійних ситуацій. Інтеграція з комунікаційними мережами забезпечує можливість дистанційного моніторингу, управління та налаштування параметрів захисту, що значно спрощує експлуатацію та підвищує надійність системи. Крім того, комп'ютерні реле захисту забезпечують гнучкість налаштувань та можливість реалізації складних логічних функцій, що дозволяє адаптувати систему захисту до конкретних умов експлуатації.

Однак, комп'ютерний релейний захист має і певні недоліки. Одним з основних є його чутливість до електромагнітних завад. Неналежний захист від імпульсної перенапруги та радіочастотних перешкод може призвести до некоректної роботи реле. Вартість впровадження та підтримки комп'ютерного релейного захисту, як правило, вища порівняно з традиційними електромеханічними реле, що може бути обмежуючим фактором для деяких підприємств.

Враховуючи вищезазначене, при виборі системи релейного захисту необхідно ретельно зважувати переваги та недоліки комп'ютерного релейного захисту, враховуючи специфіку електроенергетичної системи та економічну доцільність. Незважаючи на певні недоліки, комп'ютерний релейний захист є перспективним напрямком розвитку електроенергетики, забезпечуючи надійний та ефективний захист обладнання та безперебійне електропостачання.

**Мета:** Проаналізувати сучасний стан комп'ютерного релейного захисту, порівняти його з традиційними методами, висвітлити основні переваги, недоліки та практичні аспекти впровадження стратегії захисту в різних умовах.

**Предмет дослідження:** аналіз ефективності та обмежень комп'ютерного релейного захисту на базі мікропроцесорних систем, з акцентом на точність вимірювань, швидкість спрацьовування, інтеграцію з комунікаційними мережами та стійкість до завад; визначення ключових факторів, що впливають на надійність системи, та розробка практичних рекомендацій щодо мінімізації ризиків та економічної обґрунтованості впровадження.

**Об'єкт дослідження:** комп'ютерний релейний захист на базі мікропроцесорних систем, його алгоритмічні та апаратні складові, процеси збору та аналізу сигналів, а також взаємодія з комунікаційними мережами в контексті енергопостачання.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження :**

1. Ступак А. А., Любченко С. О.

АЛГОРИТМ УСУНЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ НА ОСНОВІ БАЗИ ЗНАНЬ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року м. Житомир

2. Савченко Л. Г., Ступак А. А.

ПОРОГОВІ ЗНАЧЕННЯ ТА АВАРІЙНІ СИГНАЛИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ: МЕЖІ ТРИВОГИ Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками I-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2.

3. Ступак А. А.

ТЕХНОЛОГІЯ АКТИВНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ (АКТ) В РЕЛЕЙНОМУ ЗАХИСТІ: ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року м. Житомир

# РОЗДІЛ 1

## КОМП'ЮТЕРНИЙ РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ: ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

### 1.1 Розвиток комп'ютерного захисту

Галузь комп'ютерного захисту розпочалася з спроб з'ясувати, чи можуть функції захисту енергосистем здійснюватися за допомогою цифрового комп'ютера. Такі дослідження розпочалися у 1960-ті роки, період, під час якого цифровий комп'ютер повільно й системно замінював багато традиційних інструментів аналітичного інженерного забезпечення електропостачання. Проблеми короткого замикання, відпуску потоку потужності та стабільності — рішення яких було головним завданням планувальників енергосистем — вже були перетворені на комп'ютерні програми, замінюючи DC-дошки та мережеві аналізатори. Захист вважали наступною перспективною та захоплюючою областю для комп'ютеризації. Одразу було ясно, що цифрові комп'ютери того періоду не могли задовольнити технічні потреби швидкодіючих функцій захисту. Також не було економічного стимулу робити це. Комп'ютери були на порядки дорожчі. Проте перспектива розробки та випробування алгоритмів захисту була привабливою для декількох дослідників. Через таку інертну, переважно академічну цікавість ця дуже плідна галузь була започаткована. Еволюція комп'ютерів за ті роки настільки стрімко розвивалася, що алгоритмічна досконалість, потрібна для програм захисту, зрештою знайшла відповідність у швидкості та економічності сучасних мікрокомп'ютерів; тому на сьогодні комп'ютерні реле пропонують найкраще економічне та технічне рішення для проблем захисту — у багатьох випадках єдино практичне рішення. Справді, ми стоїмо на початку ери, в якій комп'ютерний захист став повсякденністю, і він додатково вплинув на розвиток ефективних інструментів для моніторингу та керування системами живлення в реальному часі[1].

## 1.2 Історичний контекст.

Одне з ранніх опублікованих робіт про комп'ютерний захист досліджувало досить цікаву ідею: захист усієї апаратури в підстанції мав би здійснювати один комп'ютер.[1] Без сумніву це було зумовлено високою ціною комп'ютерів того часу (1960-ті роки), і не існувало жодного економічно доцільного способу використати кілька комп'ютерів як заміну звичайним реле, які були мінімум в один порядок дешевші за належний комп'ютер. Крім того, швидкість обчислень сучасних комп'ютерів була занадто повільною для високошвидкісного захисту, тоді як споживання потужності комп'ютерів — надто великим. Незважаючи на ці очевидні недоліки — які відображали тодішній стан розвитку комп'ютерів — наведене посилання досліджувало декілька алгоритмічних деталей захисту досить ретельно, і навіть сьогодні надає добру основу для новачків, що занурюються у складнощі сучасних практик захисту.

Декілька інших робіт були опубліковані приблизно в той же час і призвели до алгоритмічного розвитку захисту високовольтних ліній передач [2,3]. Рано було помітно, що функція захисту лінії передачі (зокрема відстань) — більше ніж будь-яка інша — є цільовою для інженерів з релейної справи через її широке використання в енергосистемах, відносно високу вартість та функціональну складність. Ці ранні дослідники розпочали вивчення алгоритмів захисту за відстанню, яке продовжується до сьогоднішнього дня без перерви. Ці дослідження привели до важливих нових висновків щодо фізичної природи процесів захисту та обмежень, до яких їх можна підштовхувати. Найімовірніше, що реалізація захисту за відстанню на комп'ютерах вже опанована більшістю дослідників до тепер, і будь-які нові досягнення в цій галузі, ймовірно, з'являться завдяки використанню покращеного апаратного забезпечення для реалізації добре зрозумілих алгоритмів захисту за відстанню.

Інший абсолютно інший підхід до захисту за відстанню було запропоновано в останні роки[4,5]. Він зазвичай базується на використанні

біжучих хвиль, ініційованих пошкодженням, для оцінки відстані до пошкодження. Захисні реле з подорожніми хвилями вимагають відносно високих частот для відбору сигналів напруги та струму. Хоча реле на основі подорожніх хвиль не надали переконливих переваг перед іншими принципами захисту з точки зору швидкості та точності, вони застосовувалися в кількох випадках у світі з задовільною продуктивністю. Алгоритми локалізації пошкоджень за допомогою біжучих хвиль були також розроблені, і є повідомлення про хороший досвід використання цих пристроїв.

На додачу до розробки алгоритмів захисту за відстанню розпочалася рання робота з апаратним захистом за принципом диференціального захисту[6–8]. Ці ранні посилення визнавали факт, що порівняно з завданням захисту лінії, алгоритми диференціального захисту менш вимогливі до обчислювальної потужності. Функція гармонійного обмеження додає деяку складність до задачі захисту трансформаторів, і проблеми, пов'язані з насиченням струмових трансформаторів чи інші неточності продовжують мати рішення, які не є простими у комп'ютерних системах захисту так само, як і у звичайних реле. Тим не менш, завдяки розвитку алгоритмів захисту за відстанню та диференціального захисту, можна стверджувати, що можливість комп'ютерних реле забезпечувати продуктивність не менше за звичайні реле була встановлена ще на початку 1970-х.

Значні досягнення в апаратному забезпеченні комп'ютерів з того часу відбулися. Розміри, споживання потужності та вартість комп'ютерів знизилися на порядки, водночас швидкість обчислень зросла на кілька порядків. Поява 16-розрядних (а нещодавно 32-розрядних) мікропроцесорів та комп'ютерів на їх основі зробила високошвидкісний комп'ютерний захист технічно досяжним, водночас вартість реле на базі комп'ютера стала порівнянною з вартістю звичайних реле. Ця тенденція продовжується дотепер — і, можливо, з певною меншою інтенсивністю, але продовжуватиметься й у майбутньому. Насправді зараз уже добре встановлено, що найдешевший та технічно найбільш досконалий спосіб будівництва систем захисту майбутнього (за винятком

деяких простих та недорогих функціонально реле) — це за допомогою цифрових комп'ютерів. Давня ідея об'єднати кілька функцій захисту в одному апаратному комплексі також частково відродилася — у сучасних багатофункціональних реле.

Зі зручними перспективами наявності доступних реле на основі комп'ютера, які можна призначати під конкретні функції захисту, увага швидко усталилася на можливостях інтеграції їх у мережі підстанцій і, можливо, навіть у системну мережу з використанням швидких ширококутних комунікаційних мереж. Ранішні роботи з цієї теми визнавали кілька переваг, які впливають з такої можливості реле для зв'язку [9,10].

### **1.3 Очікувані вигоди комп'ютерного захисту**

Коротко варто підсумувати переваги комп'ютерних реле та деякі особливості цієї технології, які вимагають нових операційних підходів. Серед переваг, які забезпечують комп'ютерні реле, такі:

#### **1.3.1 Вартість.**

За інших рівних умов вартість реле є головним чинником його прийнятності. На ранніх етапах комп'ютерного захисту вартість комп'ютерного реле була у 10–20 разів більшою за вартість звичайних реле. З роками вартість цифрових комп'ютерів стабільно знижувалася; водночас їх обчислювальна потужність (за виміром часу виконання інструкцій та довжиною слова) значно зростає. Вартість звичайних (аналогових) реле постійно зростала за той самий період, головним чином через деякі конструктивні покращення, але також через інфляцію та відносно низький обсяг виробництва та продажів. Передбачається, що за однакової продуктивної потужності вартість найскладніших цифрових реле з програмним забезпеченням буде приблизно такою ж, як у звичайних систем захисту. Очевидно, існують певні звичні реле — наприклад захист лінійного струму понад струм — настільки дешеві, що дешевше замінити їх комп'ютерними

реле поки не вигляє можливим, за умови, що вони не входять до багатофункціонального реле. Проте для великих систем захисту конкурентоспроможна вартість комп'ютерних реле стала важливим чинником.

### **1.3.2 Самодіагностика та надійність.**

Комп'ютерне реле може бути запрограмоване для постійного моніторингу кількох своїх апаратних та програмних підсистем, тим самим виявляючи будь-які збої, які можуть з'явитися. Воно може бути спроектоване так, щоб виходити з ладу в безпечному режимі — тобто само знищитися з обслуговуваної точки зору, якщо виявлено несправність — та надсилати сигнал-повідомлення до системного центру. Ця риса комп'ютерних реле, ймовірно, найістотніший технічний аргумент на користь комп'ютерного захисту. Відмова реле — не часте явище, зважаючи на велику кількість реле, що існують у енергомережі. Іншими словами, у більшості випадків катастрофічних збоїв системи причиною розгортання серії подій, що призводять до відмови, можна віднести помилкову роботу реле. У деяких випадках це є неправильне застосування реле до даної захисної задачі, але переважно причина полягає у збої компоненту реле, що веде до його неправильної роботи та збоїв у енергобезпеці. Очікується, що завдяки самодіагностиці, відбуватиметься раніше виявлення збоїв компонентів реле, і їх можна буде відремонтувати до того моменту, коли вони призведуть до неправильної роботи. У цьому сенсі, хоча комп'ютерні реле є більш складними за електромеханічні або твердотільні реле (і тому потенційно більш схильними до відмов), як система вони мають вищий рівень доступності. Зрозуміло, реле не може виявити всі відмови компонентів — зокрема ті за периметром релейної системи.

### **1.3.3 Інтеграція системи та цифрове середовище.**

Цифрові комп'ютери та цифрові технології стали основою більшості систем у підстанціях. Вимірювання, зв'язок, телеметрія та керування — усе це

комп'ютеризовані функції. Багато перетворювачів вимірювань (струмові та напругові трансформатори) переходять на цифрові системи. Оптиволоконні лінії завдяки своїй стійкості до електромагнітних перешкод (ЕМІ) швидше за все стануть середовищем передачі сигналів між точками у підстанції; це технологія, що особливо підходить для цифрового середовища. У підстанціях майбутнього комп'ютерні реле будуть дуже вписуватися у загальну картину: вони зможуть приймати цифрові сигнали від новіших трансдюсерів та оптиволоконних каналів та інтегруватися з комп'ютерними системами управління та моніторингу підстанції. Власне, без комп'ютерного захисту цифрові трансдюсери та оптиволоконні системи для передачі сигналів не мали б життєздатних систем у підстанції.

#### **1.3.4 Функціональна гнучкість та адаптивний захист.**

Оскільки цифровий комп'ютер може бути запрограмований на виконання кількох функцій за умови наявності потрібних вхідних та вихідних сигналів, реле-комп'ютер може легко взяти на себе багато інших задач підстанції. Наприклад, вимірювання та моніторинг потоків і напруги у трансформаторах та лініях передач, керування відкриттям та закриттям автоматів вимикання та розмикання, надання резерву для інших пристроїв, що відмовили — це все функції, які може взяти на себе реле на базі комп'ютера. Захист потребує інтенсивної обчислювальної діяльності, коли на системі відбувається несправність. Ця інтенсивна активність, у кращому разі, займає дуже малу частку часу експлуатації реле — менше десятої частини відсотка. Таким чином, реле-комп'ютер може виконувати ці інші задачі практично без додаткових витрат. За рахунок програмування та можливості зв'язку, комп'ютерне реле надає ще одну перевагу, яку не так легко реалізувати в традиційній системі — здатність змінювати характеристики (налаштування) реле залежно від стану системи.

Серед очікуваних переваг комп'ютерного захисту більшість з них вийшла на практиці завдяки здатності комп'ютерів до обміну даними з різними

рівнями ієрархії керування. Повне розкриття можливостей комп'ютерного захисту стало можливим лише з появою широкої мережі зв'язку, що охоплює великі підстанції. Ідеальним середовищем для передавання даних вважалось би оптоволоконні мережі через його чудову стійкість до перешкод та здатність обробляти високошвидкісні потоки даних. Здається, що вигоди такої мережі зв'язку даруються у багатьох сферах, і з появою все більшої кількості таких ліній, самі комп'ютерні реле та їхні вимірювальні можливості стануть цінними самі по собі. Якщо ж розвинені мережі комунікації відсутні, багато переваг комп'ютерного захисту так і залишаться нереалізованими.

Інші питання, що стосуються технології комп'ютерного захисту, також варто згадати. Було помічено, що цифрова комп'ютерна технологія за останні двадцять років розвивалася дуже швидко. Це означає, що апаратне забезпечення комп'ютерів має відносно короткий термін служби. Апаратне забезпечення змінюється значно кожні кілька років, і питання підтримки старого обладнання стає критичним. Існуючі реле працюють добре багато років — деякі понад 30 років. Такі реле підтримувались протягом тривалого часу. Важко уявити подібну тривалість служби для обладнання на базі комп'ютера. Можливо, рішенням стане модульність апаратного забезпечення комп'ютера; комп'ютери та периферія одного сімейства можуть забезпечити довший строк служби з заміною кількох модулів кожні кілька років. За умови, що це можливо зробити без суттєвих змін у системі захисту, таке може бути прийнятним компромісом для тривалої служби. Та очевидні наслідки швидкої зміни комп'ютерних систем очевидні виробникам та користувачам цієї технології.

Програмне забезпечення також створює свої проблеми. Програми для захисту (або критичні їх частини) зазвичай пишуться на нижчих рівнях мов програмування, таких як асемблер. Причина цього — необхідність максимально ефективно використати наявний час після виникнення несправності. Регістри захисту зазвичай обмежується обчисленнями та вводу-виводом. Вищі мови зазвичай менш ефективні для чутливих до часу

застосувань. Можливо, з часом зі збільшенням швидкості виконання інструкцій у комп'ютерах більш високорівневі мови зможуть замінити значну частину програмування на асемблері в захисті. Проблема машинних мов полягає в тому, що вони не переносяться між комп'ютерами різних типів. Деякий перехід між різними моделями однієї родини може існувати, але навіть тут зазвичай бажано розробляти нове програмне забезпечення, щоб використати різні можливості різних моделей. Оскільки вартість програмного забезпечення є дуже значною частиною розробки комп'ютерного захисту, узгодженість програмного забезпечення є суттєвою проблемою.

На ранніх етапах розвитку комп'ютерного захисту існували деякі занепокоєння щодо суворого середовища електричних підстанцій, в яких реле має функціонувати. Екстремальні температури, вологість, забруднення, а також дуже сильні ЕМІ потрібно було передбачати.

Ще одна проблема, яку часто піднімали користувачі комп'ютерних реле, стосується широкого спектру завдань, які ці реле можуть обробляти. Мало комп'ютерних реле, які не вимагали б дуже великої кількості налаштувань перед встановленням та введенням в експлуатацію. Де організація має достатній персонал для роботи з комп'ютерними реле, робота з налаштуванням не становить проблеми. Проте там, де організація мала би бути мала та спеціалізований персонал для цих застосувань не виправданий, правильне та постійне обслуговування налаштувань реле стає складним завданням. До того ж, якщо реле різного виробника використовується в одній організації, може знадобитися експерт, який зможе працювати з пристроями різних виробників. Декілька робочих груп та технічних комітетів IEEE Power Engineering Society намагалися розробити спільний інтерфейс для реле різних виробників, але це завдання видається занадто складним і значних успіхів у цьому напрямку не досягнуто[11].

## **Висновки по першому розділу.**

Комп'ютерний захист електросистеми, як відповідь на потребу швидкого та надійного реагування енергосистем; сучасні цифрові реле забезпечують економічно виправдані рішення навіть за рахунок високої технічної ефективності.

Історично сформувалися варіанти захисту за відстанню та диференціальний захист, що зумовили основу для впровадження комп'ютерних систем у реальному часі та розвиток багатофункціональних реле.

Основні переваги: зниження вартості при зростанні потужності обчислень, самодіагностика, інтеграція з цифровим середовищем керування, гнучкість налаштувань та адаптивний захист, можливість централізованого моніторингу та обміну даними.

Основні виклики й обмеження: швидкість та довговічність апаратного забезпечення, підтримка старого обладнання, сумісність програмного забезпечення, потреба у висококваліфікованому персоналі та відсутність універсальних стандартів між виробниками.

Перспектива: при подальшому розвитку апаратного забезпечення, мереж передачі даних (наприклад, оптоволоконні технології) та адаптивних алгоритмів комп'ютерні реле стануть нормою в сучасних підстанціях, але потребують модульності та узгодженості між виробниками.

## РОЗДІЛ 2

### ОСНОВНІ СКЛАДОВІ КОМП'ЮТЕРНИХ РЕЛЕ ТА ЇХ ПРИЗНАЧЕННЯ

#### 2.1 Архітектура комп'ютерних реле.

Комп'ютерні реле складаються з підсистем із чітко визначеними функціями. Хоча конкретне реле може відрізнятися за деталями, ці підсистеми найімовірніше будуть інтегровані в його конструкцію у тій чи іншій формі. Нижче описано підсистеми реле та їхні функції.

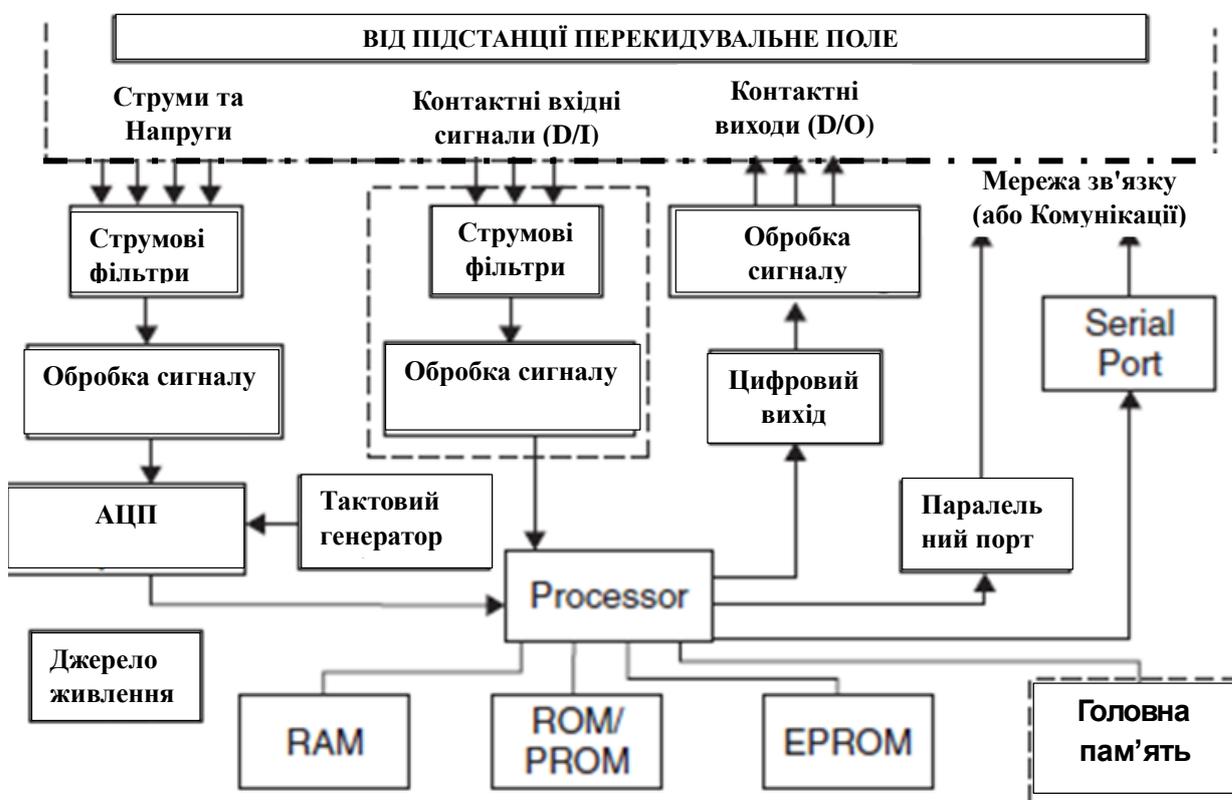


Рисунок 2.1. Підсистеми релейного комп'ютера. Пунктирна лінія зверху показує межу відкритого розподільчого пристрою. Все інше обладнання знаходиться всередині будівлі управління.

Блок-схема на Рис. 2.1 показує основні підсистеми комп'ютерного релея. Процесор є центральним у його організації. Він відповідає за виконання релейних програм, підтримку різних часових функцій та комунікацію з

периферійним обладнанням. На схемі подано кілька типів пам'яті. Доступ до пам'яті (RAM) використовується для збереження вхідних зразків даних, які надходять і обробляються. RAM також може використовуватися для буферизації даних для подальшого зберігання на більш постійному носіїві. До того ж RAM потрібна як швидка тимчасове сховище під час виконання алгоритмів реле.

Пам'ять тільки для читання (ROM) або програмована пам'ять тільки для читання (PROM) використовується для постійного зберігання програм. Іноді програми можуть виконуватися безпосередньо з ROM, якщо час читання достатньо короткий. Якщо це не так, програми повинні копіюватися з ROM до RAM під час ініціалізаційного етапу, після чого реальне виконання в режимі реального часу відбувається із RAM. Ера або EPROM необхідні для збереження певних параметрів (таких як налаштування реле), які можуть змінюватися час від часу, але після встановлення повинні залишатися фіксованими, навіть якщо живлення комп'ютера перервано. Підходить або пам'ять типу Core, або RAM із підтримкою батареї для цього завдання.

Великої ємності EPROM становить бажаний елемент комп'ютерного релея. Така пам'ять була б корисною як архівний носій даних, для збереження таблиць даних про збої, часово-мічених журналів подій та аудит-логів запитів та змін налаштувань, зроблених у реле. Основний фактор тут — вартість такої пам'яті. Вартість пам'яті знизилася настільки, що архівне збереження осцилографічних даних та послідовності подій у релях великого масштабу стало можливим.

## **2.2 Аналогова схема входу.**

Розглянемо далі аналогову входову систему. На початку варто зауважити, що Рис. 2.1 базується на використанні традиційних трансдюсерів. Якщо використовуються електронні ТТ та ТПТ (СТs та CVTs), вхідні кола можуть бути значно відмінними, і дані можуть надходити безпосередньо у пам'ять процесора. Вхідні реле — це струми та напруги, а також цифрові сигнали, які

свідчать про стан контактів. Аналогові сигнали мають бути перетворені у напруги, придатні для подальшого перетворення в цифрову форму. Це виконується за допомогою аналого-цифрового перетворювача (ADC). Зазвичай вхід ADC обмежується повзунком від  $\pm 10$  В. Сигнали струму та напруги, що надходять з вторинних обмоток трансформаторів струму та напруги, повинні бути відповідним чином масштабовані. Найбільші можливі рівні сигналів мають бути передбачені, а відношення між значенням rms та піком сигналу має бути враховане. У більшості випадків не потрібно враховувати високочастотні перехідні явища, оскільки їх усувають фільтри антиаліасингу з низькою частотою відсікання. Виняток становлять волнові реле, які використовують високі частоти компонентів з високою частотою (traveling wave). Для таких реле масштабування сигналів має бути таке, щоб увесь вхідний сигнал з його найбільшим очікуваним високочастотним компонентом не перевищував діапазон вхідного ADC.

Вхідні дані струму мають перетворюватися на напруги — наприклад, за допомогою резистивних шунтів. Оскільки вторинні струми нормального ТТ можуть становити сотні ампер, потрібні шунти опором кілька міліомів для створення бажаної напруги для ADC. Альтернативна конфігурація — використати допоміжний трансформатор струму, щоб знизити струм до нижчого рівня. Проте будь-які неточності в допоміжному трансформаторі струму вноситимуться у загальну помилку перетворення, і мають бути мінімізовані. Допоміжний трансформатор струму виконує ще одну функцію: забезпечує електричну ізоляцію між вторинною ланкою основного СТ та вхідною системою комп'ютера. У цьому випадку шунт може бути заземлений посередині, щоб забезпечити збалансований вхід до наступних підсилювачів та фільтрів. Такі концепції ілюстровано на Рис. 2.2(a) та (b).

З'єднання з трансформатором напруги зображено на Рис. 2.2(c). Для кожного інструмента або реле передбачена запобіжна ланка, і може бути передбачена подібна ланка для комп'ютерного релея. Нормальна напруга на вторинній обмотці трансформатора напруги становить 67 В RMS для з'єднання

фази з нейтраллю. Вона може знижуватися до бажаного рівня за допомогою опірної ділянки напруги, розрахованого на забезпечення достатнього опору джерела для подальших етапів фільтрів та підсилювачів.

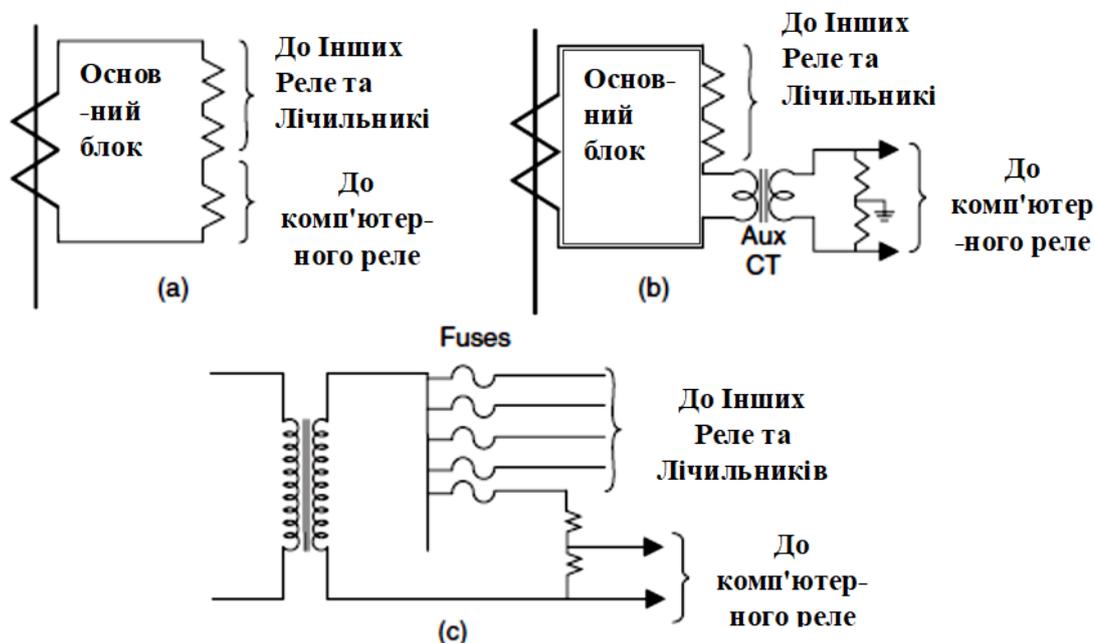


Рисунок 2.2 Масштабування сигналів струму та напруги для подачі на реле. (а) Пряме підключення у вторинній обмотці основного ТС. (б) Використання допоміжного ТС. (с) Трансформатор напруги та потенційний дільник.

Хоча допоміжний трансформатор напруги може бути використаний у цьому випадку для додаткової ізоляції, це не є обов'язковим. Цифрові входи до комп'ютерного реле зазвичай — це стан контактів, надходить від інших реле або підсистем усередині підстанції. Якщо інші підсистеми комп'ютерні, ці сигнали можуть надходити до комп'ютерного реле без спеціальної обробки. Винятком може бути оптично ізольована схема, яка забезпечує ізоляцію між двома системами. Коли цифрові входи отримуються від контактів у дворі (або у контрольному залі), необхідно застосувати фільтрацію струмопровідних імпульсів та (або) оптичну ізоляцію для ізоляції комп'ютерного реле від суворого середовища підстанції.

Придушення імпульсної перенапруги в проводці, підключеній до будь-якої системи захисту, є спеціалізованою темою з великою кількістю літератури [12,13]. Перенапруги високої напруги та з великим запасом енергії передаються в проводку, яка з'єднує струмові, напругові та цифрові входи з системою захисту.

Перенапруги виникають через пошкодження та комутаційні операції в енергосистемі, або через певні типи комутацій у приміщенні керування. Наприклад, іскріння контактів в індуктивних схемах захисту та керування всередині приміщення керування виявилось джерелом дуже значних збурень.[14] Придушення цих перенапруг вимагає ретельного заземлення та екранування провідників та обладнання, а також фільтрації нижніх частот. Нелінійні енергопоглинаючі металооксидні варистори (MOV) також можуть бути використані. Фільтри придушення перенапруги необхідні для вхідної та вихідної проводки, а також для проводів живлення.[12]

ADC та фільтр антиаліасінгу (згладжування недоліків дискретизації), пов'язані з процесом зразків. Наразі достатньо усвідомити їхню функцію у загальному процесі реле. Фільтри антиаліасінгу — це аналогові фільтри низьких частот, розроблені під конкретну частоту дискретизації. Інстанси зразків визначає такт вибору, який повинен видавати імпульси з фіксованою частотою. На кожен момент часу, визначений тактом, відбувається перетворення з моментального значення аналогового вхідного сигналу (напруга або струм) у цифрову форму за допомогою ADC, і це доступне процесору. Оскільки реле зазвичай потребує кількох входів, під час кожного моменту зразку виконується кілька перетворень. Бажано (хоча й не обов'язково) щоб усі зразки були одночасно зафіксовані, що означає або дуже швидке перетворення та передача на процесор кожного зразка, або одночасне вибір та утримання сигналів на однаковий момент для подальшої обробки за повільнішого режиму.

Як видно, у загальному випадку, можливе кілька входів, і кілька перетворень робляться на кожен момент зразку. Це характерно для систем із

мультиплексованим аналоговим входом. Третій варіант, технічно можливий, але дорогий — використати окремі ADC для кожного каналу. Тенденції розвитку ADC та зниження вартості вказують на те, що використання окремих ADC для кожного сигналу стане переважним. Ці варіанти проілюстровано на рисунку 1.3.

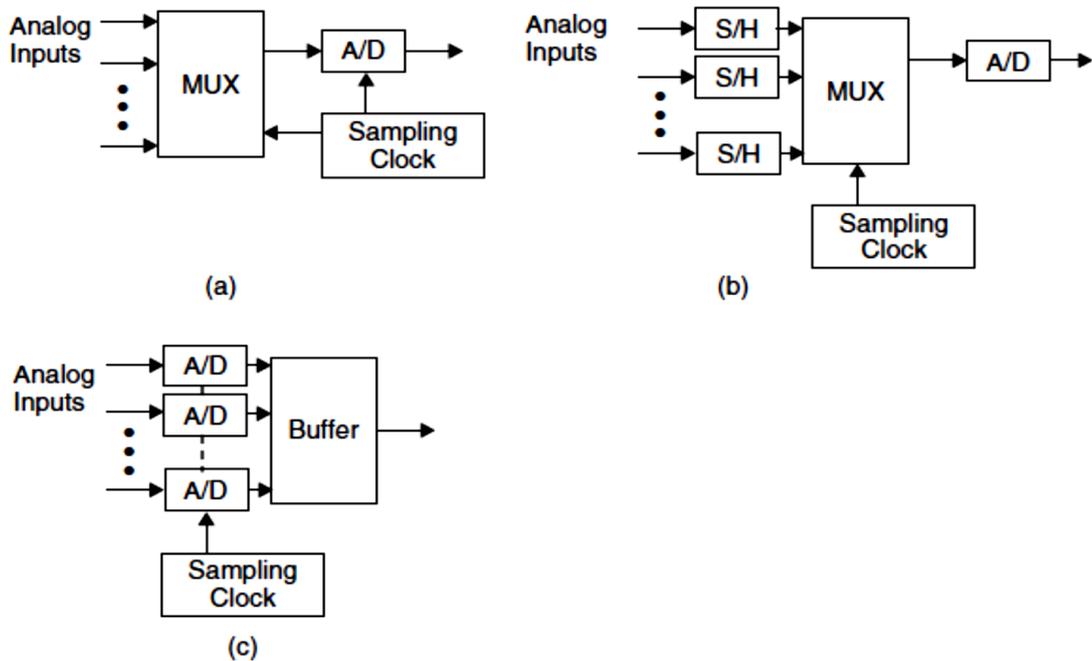


Рисунок 2.3 Процес дискретизації множинних сигналів та його організація. (a) Один АЦП з мультиплексованим входом. (b) Схема вибірки-зберігання, додана до кожного каналу. (c) Окремий АЦП для кожного каналу.

Повертаючись до Рис. 2.1, цифровий вихід від процесора використовується для забезпечення релейного виводу у формі відкритих або закритих контактів. Паралельний вихідний порт процесора надає одне слово (зазвичай дві байти) для цих виходів. Кожен біт може використовуватися як джерело для одного контакту. Вихідний біт комп'ютера є сигналом рівня TTL і буде оптично ізольований перед приведенням до високошвидкісної багатоконтактної лінії чи тиристорів, які, у свою чергу, можуть запускати зовнішні пристрої, такі як сигналізація, обмотки роз'єднувачів, контроль переносника тощо.

Наскільки відзначено на Рис. 2.3, блок живлення зазвичай являє собою один вхідний DC/DC перетворювач з кількома виходами, живлений від станційної батареї. Вхід зазвичай становить 125 В постійного струму, а вихід може бути 5 ВDC та  $\pm 15$  ВDC. Зазвичай 5 В необхідні для живлення логіки, тоді як 15 В потрібні для аналогових коливань. Станційна батарея, звісно, постійно заряджається від станційного змінного струму.

### **Висновки по другому розділу.**

Комп'ютерне реле побудоване з чітко визначених підсистем, основну роль виконує процесор, який виконує програми, керує часом та периферією.

Пам'ять: RAM для збереження даних та тимчасових буферів; ROM/PROM для постійних програм; EPROM/Era для збереження налаштувань; перспективи використання великих за обсягом EPROM для архівів журналів за зниження вартості.

Аналогово-цифрові входи та масштабування: ADC з зазвичай  $\pm 10$  В, антиаліас-фільтри; можливе застосування допоміжних СТ для ізоляції та зменшення струмів.

Цифрові входи та захист: ізоляція (оптична), фільтрація імпульсів, придушення перенапруги в лініях керування та захисту.

Обробка сигналів: варіанти з одним АЦП із мультиплексуванням, або кількома АЦП на канал; майбутнє очікувань на використання окремих ADC через зниження вартості.

Вихідні інтерфейси: TTL-виходи з оптичною ізоляцією для безпечного керування зовнішнім обладнанням.

Живлення: DC/DC з кількома виходами (5 В для логіки та  $\pm 15$  В для аналогових), вхід  $\sim 125$  ВDC; батарея заряджається від станційного змінного струму.

Висновок: архітектура балансуватиме між вартістю, точністю та швидкістю обробки; ізоляція та захист критично важливі для надійної роботи в умовах підстанцій.

## 3 РОЗДІЛ

### КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗАХИСТ ТРАНСФОРМАТОРІВ, МАШИН ТА ШИН

#### 3.1 Основні положення.

Цей розділ присвячено алгоритмам захисту силових трансформаторів, генераторів і шин. Усі ці пристрої можуть бути захищені алгоритмами, що базуються на принципах диференційного захисту, оскільки вимірювання на всіх терміналах можуть бути доступні для алгоритму. Однак, кожен тип алгоритму повинен враховувати ефекти, які можуть спотворювати відносну диференційну характеристику. Алгоритми захисту силових трансформаторів повинні бути розроблені для правильної роботи за наявності струму намагнічування (який з точки зору відносної диференційної характеристики виглядає як внутрішнє пошкодження) і за наявності перезбудження, яке має подібний ефект. Насичення трансформаторів струму є додатковою проблемою в захисті силових трансформаторів і фундаментальною проблемою в захисті шин. Захист генераторів зазвичай складається з багатьох задач, які також включають функції керування. Диференційний захист генераторів, як правило, є простою задачею, оскільки використовувані трансформатори струму підібрані та розраховані таким чином, щоб створювати дуже малий диференційний струм при зовнішніх пошкодженнях. Захист двигунів також включає багато функцій керування.

У деяких випадках, таких як використання гармонічного утримання для вирішення проблем кидка струму та перезбудження, існує майже пряма цифрова реалізація загальноприйнятої практики релейного захисту. Однак існують незначні відмінності в тому, як аналогові фільтри отримують гармонічну складову сигналів, на відміну від цифрових методів. В інших випадках загальноприйнятої практики релейного захисту, таких як високоімпедансний захист шин, немає цифрової реалізації, і необхідно знайти нові цифрові рішення. Для генераторів фазового обчислення струмів, напруги і вимірювання частоти достатньо для задоволення всіх потреб у захисті.

У інтегрованій цифровій системі захисту підстанцій нові рішення деяких з цих проблем стають можливими завдяки збільшенню обсягу даних, які можна використовувати при прийнятті рішень. Звичайний захист силового трансформатора використовує лише вимірювання струму. В інтегрованій підстанції передбачається, що всі вибірки напруги і струмів будуть синхронізовані, щоб дані можна було обмінювати, як для резервування, так і для покращення прийняття рішень. Таким чином, стає можливим використання вимірювань напруги в захисті трансформатора.

### **3.2 Алгоритми захисту силових трансформаторів.**

Деяка версія процентної диференціальної характеристики є частиною майже всіх запропонованих алгоритмів для трансформаторів. Якщо розглянути триобмотковий трансформатор, як показано на рисунку 3.1, з полярністю струмів, як показано, струм відключення визначається наступним чином:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

поки існують два стримувальні струми, задані

$$I_{R1} = I_1 - I_2 - I_3$$

Та

$$I_{R1} = -I_1 + I_2 + I_3$$

Другий струм гальмування необхідний для захисту трансформатора, що працює з розімкнутим первинним вимикачем. Хоча значна частина початкової розробки алгоритму базувалася на однофазній основі, кінцевим застосуванням є трифазний пристрій. Таким чином, буде три струми спрацювання (по одному на фазу) та шість струмів гальмування (по два на фазу) для трифазного триобмоткового трансформатора.

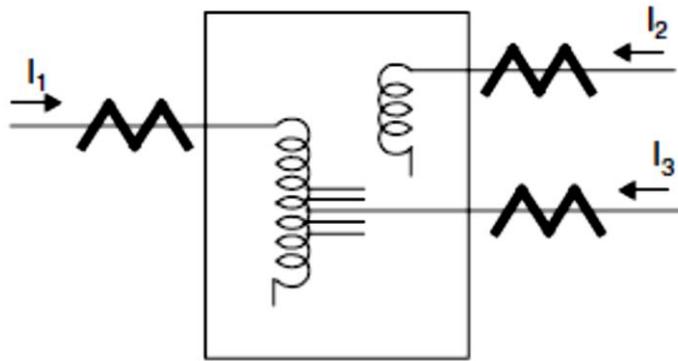


Рисунок 3.1 Триобмотковий трансформатор

Хоча процентну диференціальну характеристику, зображену на рисунку 3.11, можна було б застосувати до кожної фази (перевіряючи кожен зі струмів утримання на відповідність струму спрацювання) на основі кожного зразка, зрозуміло, що в зразках є похибки (як і в релейному захисті ліній), і що певне фільтрування покращило б продуктивність. Важливіше те, що процентна диференціальна характеристика має бути заблокована під час періодів кидків струму намагнічування або перезбудження. Перший клас алгоритмів для трансформаторів включає ті, які формують утримання для процентної диференціальної величини на основі самих вимірювань струму.

### 3.2.1 Поточні похідні обмеження.

Наявність другої гармоніки у пусковому струмі трансформатора та наявність п'ятої гармоніки у струмі, який протікає в умовах перезбудження, приводять до принципу гармонічного гальмування. В аналогових реле фільтри використовуються для отримання певної комбінації не-основних частотних компонентів. Коли вихідний сигнал цих фільтрів високий, реле затримується. Ранні цифрові версії гармонійно-гальмівного відсотково-диференціального реле відрізняються технікою отримання гармонійної складової струмів. Були запропоновані методи, засновані на ідентифікації форми хвилі,1 на

використанні рекурсивних смугових цифрових фільтрів,<sup>2</sup> на взаємній кореляції з синусоїдами або прямокутними хвилями,<sup>3</sup> на цифрових фільтрах з кінцевою імпульсною характеристикою,<sup>4</sup> на перетвореннях типу Уолша,<sup>5</sup> апроксимації кривої методом найменших квадратів,<sup>6</sup> та дискретному перетворенні Фур'є.<sup>7</sup> Ідентифікація форми хвилі базується на спостереженні, що в умовах пускового струму піки струмової хвилі знаходяться або ближче один до одного, або далі один від одного, ніж зазвичай. Решта алгоритмів є спробами отримати прості обчислювальні методи для визначення гармонійного складу струмів. Занепокоєння щодо обчислювальної ефективності мотивоване великою кількістю струмів, які задіяні для трифазного багатообмоткового трансформатора. Як було зазначено в розділі 4, дискретне перетворення Фур'є дає оптимальні оцінки, якщо припустити постійну коваріацію похибок. Рекурсивна форма ДПФ для основних та гармонійних частот особливо проста при відповідній частоті дискретизації. Було виявлено, що ці рекурсивні обчислення ДПФ представляють найкращий компроміс між швидкістю обчислення та точністю результатів.[15]

Рекурсивна форма повного циклу обчислення Фур'є  $n$ -ої гармоніки (в комплексній формі – див. рівняння (4.34)) для вибірок, що закінчуються на вибірці  $L$ , задається формулою

$$Y_n^{(L)} = Y_n^{(L-1)} + \frac{2}{K} (y_L - y_{L-K}) e^{-jnL\theta} \quad (3.1)$$

де  $K(\theta) = 2\pi$ .

Тобто, корекційний член для  $n$ -ї гармоніки – це різниця між найновішим зразком і найстарішим (давністю в один цикл), помножена на кут, який обертається швидше для вищої гармоніки.

За частоти дискретизації 12 відліків на цикл єдиним ірраціональним числом, задіяним в оновленні, є  $\sqrt{3}/2$ . Якщо це множення виконується зовні за допомогою дільника напруги або програмно, як у прикладі 4.2, тоді таблицю коефіцієнтів для множення в рівнянні (3.1) можна подати у термінах двох каналів даних, як показано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Один цикл коефіцієнтів для основної, другої та п'ятої гармонік з частотою дискретизації 12 відкликів на цикл

Гармоніка	1	1	1	1	2	2	2	2	5	5	5	5
Речова	x	x			x	x			x	x		
Уявна			x	x			x	x			x	x
Канал Підсилення												
1.0	x		x		x		x		x		x	
0.866		x		x		x		x		x		x
n												
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
2	0	1	1/2	0	1/2	0	0	1	0	-1	1/2	0
3	1/2	0	0	1	-1/2	0	0	1	1/2	0	0	-1
4	0	0	1	0	-1	0	0	0	0	0	1	0
5	-1/2	0	0	1	-1/2	0	0	-1	-1/2	0	0	-1
6	0	-1	1/2	0	1/2	0	0	-1	0	1	1/2	0
7	-1	0	0	0	1	0	0	0	-1	0	0	0
8	0	-1	-1/2	0	1/2	0	0	1	0	1	-1/2	0
9	-1/2	0	0	-1	-1/2	0	0	1	-1/2	0	0	-1
10	0	0	-1	0	-1	0	0	0	0	0	-1	0
11	1/2	0	0	-1	-1/2	0	0	-1	1/2	0	0	1
12	0	1	-1/2	0	1/2	0	0	-1	0	-1	-1/2	0

Для триобмоткового трансформатора необхідно обчислити основну гармоніку, другу та п'яту гармоніки для кожного з дев'яти фазних струмів. Існують докази того, що надійну функцію стримування для трифазного трансформатора можна сформувати, поєднавши гармоніки від усіх трьох фаз.[16] Типовий алгоритм може потім сформувати два обмеження по гармоніках: одне – сума модулів трьох других гармонік, а друге – сума модулів трьох п'ятих гармонік. Позначаючи ці суми як  $I_{H2}$  та  $I_{H5}$ , реле стримується для даної фази, якщо:

$$|I_T| < \alpha$$

або

$$|I_T| < \beta |I_{R1}|$$

або

$$|I_T| < \beta |I_{R2}| \quad (3.2)$$

або

$$|I_T| < \gamma |I_T|$$

або

$$|I_{H5}| < \delta |I_T|$$

де  $\alpha$  – порогове значення,  $\beta$  – нахил відсоткової диференціальної характеристики, а  $\gamma$  та  $\delta$  – відсоткові гармонічні обмеження. Струми в рівнянні (3.2) є значеннями фази повного циклу, обчисленими за рівнянням (3.1). Слід зазначити, що фактори, які впливають на вибір цих параметрів, включають не тільки тип трансформатора та сталь, але й конструкцію фільтрів захисту від спотворення (anti-aliasing filters). Необхідність використання п'ятої гармоніки передбачає частоту дискретизації не менше 12 вибірок на цикл. При такій частоті п'ята гармоніка знаходиться досить близько до частоти зрізу фільтра захисту від спотворень і може бути ним послаблена. Параметр  $\gamma$  слід вибирати з урахуванням цього ефекту.

Як приклад цього типу алгоритму, на рисунку 3.2 показано реакцію різних струмів гальмування на внутрішнє первинне замикання фази "а" на землю. Замикання відбулося приблизно на відліку 14. До відліку 17, перш ніж будь-яка фаза видала сигнал на відключення, друга та п'ята гармоніки гальмування були ефективними. На відліку 17 диференційний струм фази "а" вказав на відключення, але реле було загальмоване гармоніками. П'ята гармоніка зникає на відліку 22, а друга гармоніка гальмування зникає на відліку 27. Сигнал на відключення буде видано на відліку 27, через один цикл після початку замикання. Загалом, гармоніки розвиваються швидше, ніж

основна частота під час перехідного процесу, тому реле гальмується гармонікою приблизно протягом повного циклу.

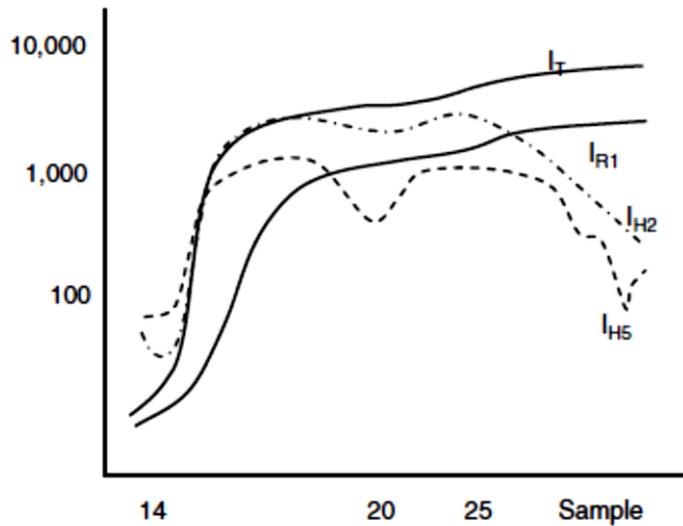


Рисунок 3.2. Реакція струмів утримання та відключення на внутрішнє замикання на землю.

### 3.2.2 Обмеження на основі напруги.

Як зазначено, в інтегрованій системі релейного захисту підстанції цілком обґрунтовано припустити, що вимірювання напруги шин будуть доступні для захисту трансформатора. Хоча вимога додаткових вимірювань напруги збільшить вартість окремого пристрою захисту трансформатора, такі вимірювання напруги можуть бути отримані досить недорого в інтегрованій системі. Фактично, одне з ранніх рішень проблеми кидка струму використовувало вимірювання напруги для стримування відсотково-диференційного захисту.[17] Так званий "пригнічувач відключення" використовував реле напруги для придушення функції відключення, якщо напруга була високою. У своїй ранній аналоговій формі, "пригнічувач відключення" виявився повільнішим, ніж пристрої гармонічного стримування. Оскільки алгоритм гармонічного стримування, по суті, є реле одного циклу, і оскільки алгоритми лінійного захисту з коротким вікном можуть обчислювати фазу напруги всього за чверть циклу, було висловлено припущення, що

цифровий "пригнічувач відключення" може бути швидшим, ніж цифровий алгоритм гармонічного стримування.[18]

Запропонований алгоритм використовував вікно в пів циклу для розрахунку основних частотних складових струмів відключення та загальмування та первинної напруги для кожної фази. Було визначено, що необхідно включити монітор перехідних процесів для сигналів напруги. Таким чином, для триобмоткового трансформатора, один струм відключення та два струми загальмування, первинна напруга та значення монітора перехідних процесів мають бути оновлені для кожної фази. Це становить загалом 27 оновлень у формі рівнянь (враховуючи дійсну та уявну частини для фази напруги та струму), що можна порівняти з 30 такими простими оновленнями для алгоритму гармонічного загальмування (основна складова струму відключення та двох струмів загальмування, а також друга та п'ята гармоніки одного з струмів загальмування для кожної фази). Економія полягає просто в тому, що  $t_V$  є дійсним, а не комплексним числом.

Реле загальмоване для даної фази, якщо

$$|I_T| < \alpha$$

або

$$|I_T| < \beta |I_{R1}|$$

або

$$|I_T| < \beta |I_{R2}| \quad (3.3)$$

або

$$|V| > \sigma$$

або

$$|t_V| > \rho$$

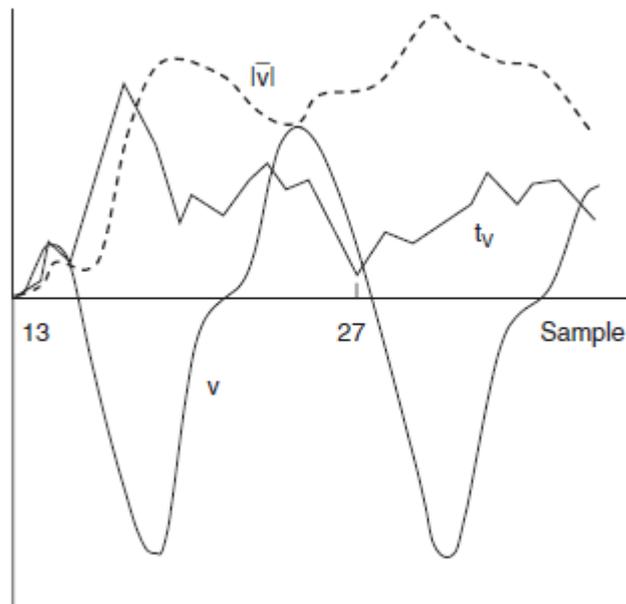


Рисунок 3.3. Фазні напруги фази с для алгоритму стримування за напругою – пусковий струм

Величини в рівнянні (3.3) тепер є результатами півперіодові фази, а не повними величинами циклу рівняння (3.2). Перші три нерівності в рівнянні (3.3) визначають процентну диференційну характеристику, а останні дві стримують, якщо напруга висока або монітор перехідних процесів вказує на ненадійність фази напруги. Монітор перехідних процесів необхідний, оскільки форма сигналу напруги може бути настільки спотвореною, що півперіодна фаза напруги виявляється недостатньо велика. Величини напруги для фази с для випадку кідка струму показані на рисунку 3.3. Значне спотворення напруги викликане кідком струму. Кідка струму достатньо, щоб спричинити диференційне відключення по струму у фазах а та с. Для вибірок 17–23 тільки монітор перехідних процесів стримує фазу а, тоді як на вибірці 27 монітор відключається, але висока напруга стримує фазу с.

Алгоритм стримування по напрузі потенційно швидший, ніж алгоритм стримування гармоніки, оскільки він базується на обчисленні півперіоду. Він також дещо менш складний для реалізації на мікропроцесорі.

### 3.3 Захист генератора.

Захист генераторів за допомогою комп'ютерів не отримав стільки уваги, як захист ліній або трансформаторів. Насамперед, кількість систем захисту генераторів в енергосистемі невелика, оскільки в енергосистемі небагато генераторів. Відповідно, немає такого великого економічного стимулу для заміни існуючих реле комп'ютерними реле в цьому випадку. По-друге, тягар захисту електростанції часто лягає на систему керування станцією, яка повинна мати справу з котлом, турбіною, генератором і системою збудження в цілому; і часто вже є комп'ютеризованою. Багато систем захисту на електростанції є механічними за своєю природою. Електрична частина захисту включає в себе захист обмоток статора та ротора, а також кілька інших функцій захисту та сигналізації, які ближчі до функцій керування.

#### 3.3.1 Диференціальний захист обмоток статора.

Ранні роботи в цій області були обмежені можливостями доступних мікрокомп'ютерів.[19] На сучасному етапі розвитку комп'ютерної техніки, процентно-диференційний захист обмоток статора є відносно простою задачею.

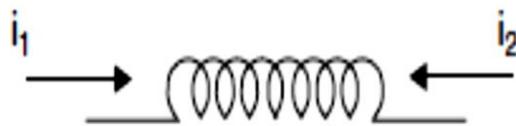


Рисунок 3.6 Струми на двох кінцях обмотки генератора

Якщо припустити, що одночасні вимірювання струмів на двох кінцях обмотки статора отримано (див. Рисунок 3.6), то для виявлення наявності пошкодження можна використовувати процентно-диференційне співвідношення для кожної вибірки:

$$i_d(k) = i_1(k) + i_2(k)$$

$$i_r(k) = i_1(k) - i_2(k)$$

$$i_d(k) \leq Ki_{1r}(k) \text{ якщо ні} \quad (3.4)$$

то

$$i_d(k) > Ki_{1r}(k)$$

Більш надійне рішення можна отримати, якщо для порівняння використовувати фазори, оцінені на основі  $i_1(k)$  та  $i_2(k)$ . Для усунення впливу постійної складової струму необхідно використовувати або імітаційну схему, або метод дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) за повний цикл для обчислення фазорів. Постійна складова у струмі короткого замикання генератора майже напевно згасає дуже повільно, тому ДПФ за один цикл буде несприйнятливим до помилок, спричинених постійною складовою. Очевидно, що ДПФ за один цикл дозволяє створити реле, яке спрацює приблизно за один цикл, але в більшості випадків цього може бути достатньо швидко. Відсоткове диференціальне рівняння в термінах фази подібне до дискретизації версії рівняння (3.4):

$$I_d = |I_1 + I_2|$$

$$I_r = |I_1 - I_2|$$

$$I_d \leq KI_r \text{ якщо ні} \quad (3.5)$$

то

$$I_d > KI_r$$

Насичення трансформаторів струму – хоч і можливе – мало ймовірно у випадку диференціального захисту генератора, оскільки трансформатори струму мають достатній запас, щоб уникнути насичення протягом перших кількох періодів. Якщо використовується монітор перехідних процесів для блокування спрацювання, коли трансформатор струму може бути насичений, порівняння фази не буде проводитися в умовах насичення ТС, і найгірше, що

може статися, це те, що реле буде повільно реагувати на внутрішні пошкодження, якщо трансформатори струму все ж наситяться. Невеликий ступінь насичення можна компенсувати за допомогою диференціального реле зі змінним нахилом. Якщо використовується диференціальний захист на основі вибірок, необхідно вжити заходів для припинення перевірки диференціалу за вибірками при виявленні насичення (наприклад, за допомогою моніторів перехідних процесів).

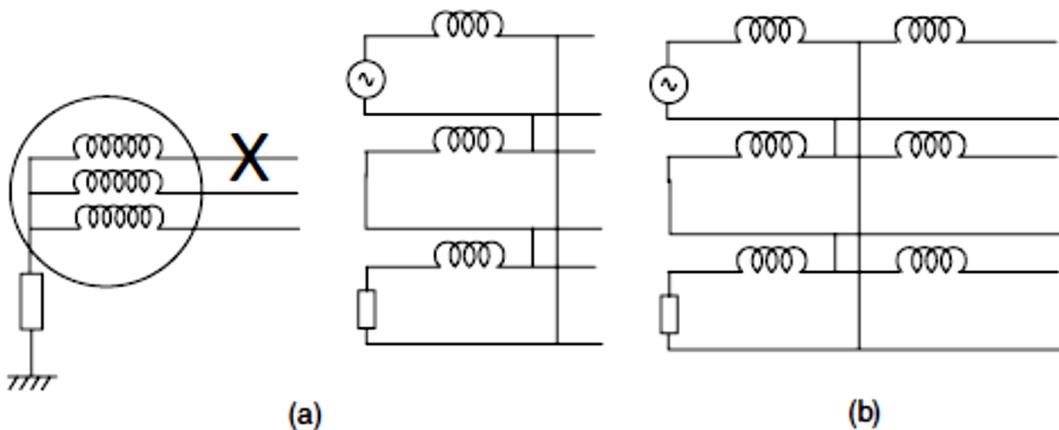


Рисунок 3.4 Генератор із замиканням на землю. (а) Представлення генератора та зовнішнє пошкодження. (б) Внутрішнє пошкодження. З'єднання схем заміщення зворотньої, прямої та нульової послідовностей відбувається всередині контуру машини в останньому випадку.

### 3.3 Захист двигуна.

Двигуни, розраховані на напругу від 600 до 4800 вольт, зазвичай захищаються запобіжниками, тоді як двигуни, розраховані на напругу від 2400 до 13 800 вольт, захищаються реле.[18] Реле максимального струмового захисту з часовою затримкою, що використовуються для захисту двигунів, нічим не відрізняються від тих, що використовуються для захисту ліній живлення.

При забезпеченні захисту більших двигунів за допомогою комп'ютера необхідно вимірювати струми та напруги, а також обчислювати фазори та

симетричні складові. Максимальний струмовий захист з часовою затримкою може бути реалізований шляхом визначення величини фази струму. Інший тип захисту, який використовується для двигунів, полягає в захисті від незбалансованого джерела живлення. Це може бути забезпечено шляхом вимірювання величини струму (або напруги) зворотної послідовності як міри незбалансованості джерела, і якщо виявлено, що вона перевищує значення спрацювання, двигун вимикається.

Цікавим аспектом захисту асинхронних двигунів є те, щоб захист реагував на підвищення температури в обмотках, а не на струм статора, як це було б забезпечено реле максимального струмового захисту з часовою затримкою.[19,20] Комп'ютер пропонує можливість створити теплову модель статора та ротора, яка забезпечує оцінку температури обмотки, на основі якої можна визначити безпечний режим роботи.

Реле захисту від перевантаження за часом повинні бути налаштовані на відключення у випадку заклинювання ротора, але при цьому повинні витримувати пусковий струм протягом часу, необхідного двигуну для досягнення робочої швидкості. Якщо двигун запускається з великим інерційним навантаженням, реле захисту від перевантаження може відключитися через довший час, необхідний двигуну для досягнення робочої швидкості (і нормального струму). Аналогічно, складно налаштувати реле перевантаження, оскільки здатність двигуна витримувати перевантаження залежить від температури обмоток до застосування перевантаження. Можна розрахувати втрати потужності в обмотках статора і ротора за допомогою напруги і струму на клеммах, а також констант машини. Ця втрата потужності використовується в тепловій моделі, яка враховує теплоємність машини, її втрати тепла і температуру навколишнього середовища. В одній з реалізацій такої моделі,[20] також передбачено вхід для датчика температури, щоб зробити теплову модель більш точною або навіть непотрібною. Слід зазначити, що ці функції доступні у багатьох звичайних системах захисту.

Як і у випадку захисту генератора, захист двигуна тісно пов'язаний з керуванням двигуном. Мікропроцесорні інтегровані пакети захисту та управління стають все більш поширеними в промисловості.

### 3.4 Цифровий захист шин.

Комп'ютерний релейний захист шин привернув ранню увагу,[21] а потім інтерес ослаб до останнього часу, коли захист шин став частиною інтегрованої системи захисту та управління для всієї підстанції.[22] Захист шин в інтегрованій системі видається особливо доречним, оскільки всі вхідні дані, необхідні для захисту шин (струми у всіх вимикачах і роз'єднувачах, підключених до шини), зазвичай доступні у всіх інших системах захисту на підстанції.

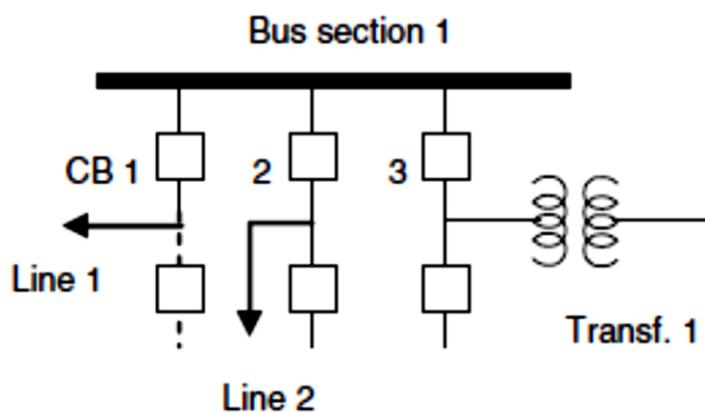


Рисунок 3.5. Фрагмент підстанції з півтора вимикачами на приєднання. Комп'ютер релейного захисту шинної секції 1 може отримувати необхідні струми від інших комп'ютерів релейного захисту.

Розглянемо секцію шини 1, показану на рисунку 3.5, де комп'ютери захисту ліній 1 і 2, і трансформатора 1 використовують струми у вимикачах СВ1, СВ2 та СВ3. Ці значення струму можуть бути передані їхніми відповідними системами захисту комп'ютеру захисту шин через комп'ютерні з'єднання. Питання надійності та резервування обладнання мають розглядатися окремо.

Проектування системи захисту шин в основному визначається характеристиками трансформаторів струму. Перш за все, диференціальний захист шин вимагає, щоб усі трансформатори струму мали ідентичні коефіцієнти трансформації, чого не завжди легко досягти за будь-яких обставин. Будь-яка розбіжність між коефіцієнтами трансформації ТС має бути компенсована допоміжними трансформаторами струму, які додають власні похибки до загальної похибки, спричиненої розбіжністю ТС в системі захисту шин. У комп'ютерному реле допоміжні трансформатори струму не потрібні, оскільки будь-яка розбіжність коефіцієнтів трансформації головних ТС може бути скоригована програмно. Однак, набагато серйознішою проблемою є насичення ТС при зовнішньому. Дуже елегантне рішення, яке пропонує диференціальне реле захисту шин з високим імпедансом, не може бути використане в комп'ютеризованій системі захисту, оскільки кожен струм вимірюється індивідуально: аналогова сума струмів фідерів не формується. (Це можна було б зробити, але це звело б нанівець значну економічну вигоду, яка виникає внаслідок спільного використання вхідної інформації на комп'ютерному рівні.) Необхідно знайти новий підхід до проблеми захисту шин в інтегрованій системі.

Не враховуючи на даний момент проблему насичення ТС (трансформаторів струму), очевидно, що може бути використано відносний диференціальний реле, що базується або на порівнянні вимірів струмів у кожний момент часу, або на струмових векторах. Струмові вектори – завдяки значній фільтрації – забезпечують чутливу та точну схему релейного захисту. Останній варіант також є повільнішим: надійну оцінку вектора необхідно сформувати на основі достатнього вікна даних, перш ніж можна буде визначити диференціальні та гальмівні струмові вектори. Комбінація відносного диференціального релейного захисту на основі векторів і на основі миттєвих значень була включена як компонент пакета захисту шин в одній комерційно доступній системі.[23] Схема на основі векторів може використовуватися до тих пір, поки немає значного насичення ТС: або на

початку під час пошкодження до настання насичення, або значно пізніше після того, як ТС вийдуть зі стану насичення. Функція моніторингу перехідних процесів є зручним індикатором стану ТС. Розрахунок вектора за чверть періоду в поєднанні з монітором перехідних процесів за чверть періоду забезпечить відповідне комп'ютеризоване диференціальне реле захисту шин.

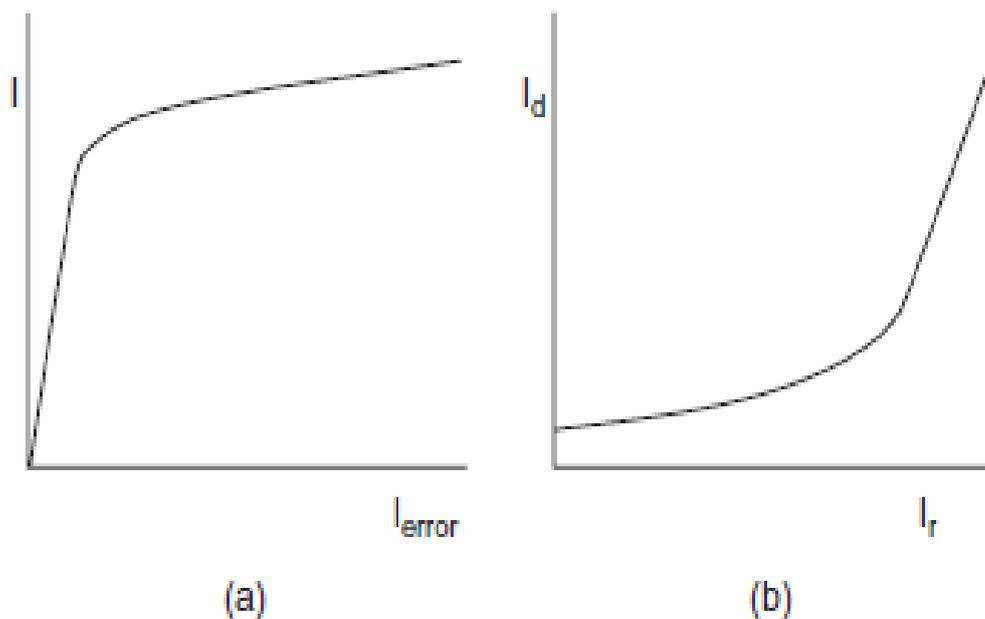


Рисунок 3.6. Характеристика намагнічування трансформатора струму. (а) Вторинний струм  $I$  у ustalеному режимі створює вторинну напругу  $V$  та струм намагнічування  $I_{error}$ . (б) Нелінійна відсоткова диференціальна характеристика.

Варто згадати про одну інновацію у відносних диференціальних реле. [24] Зазвичай, відносне диференціальне реле працює з постійним нахилом, виходячи з припущення, що похибка ТС (трансформатора струму), якщо не враховувати перехідне насичення, пропорційна первинному струму. З іншого боку, характеристика насичення ТС чітко показує – див. рисунок 3.6(а) – що при збільшенні напруги ТС внаслідок збільшення вторинного струму, похибки зростають непропорційно. Очевидно, що така поведінка похибки потребує

відносної диференціальної характеристики з прогресивно зростаючим нахилом, як показано на рисунку 3.6(b). Така характеристика зі змінним нахилом була б бажаною як для алгоритмів відносного диференціального захисту на основі вибірок, так і на основі фазв. Вона реалізована у спрощеному вигляді в багатьох звичайних диференціальних реле шин, і її слід враховувати для всіх комп'ютерних диференціальних реле, які використовують трансформатори струму з магнітопроводом.

Загальною проблемою для всіх диференціальних захистів є те, що насичення трансформаторів струму (ТС) може настати вже через кілька мілісекунд після виникнення пошкодження. Замість розробки надзвичайно коротких алгоритмів ДПФ, для забезпечення захисту протягом перших кількох мілісекунд можна використовувати процентну диференціальну характеристику на основі вибірок. Зазвичай бажано мати принаймні три вибірки для прийняття надійного рішення, щоб уникнути впливу єдиної некоректної точки даних. Для зовнішніх пошкоджень, коли процентне диференціальне реле створює обмеження, буде безпечно ґрунтувати таке рішення на двох або навіть на одній вибірці: оскільки майже неможливо, щоб у випадку внутрішнього пошкодження некоректна точка даних мала точно правильну величину та полярність, щоб призвести до відсутності спрацювання. У разі внутрішніх пошкоджень рішення про спрацювання має бути підтверджено збігом трьох або більше точок даних. Ці ідеї проілюстровано на блок-схемі рисунка 3.7.

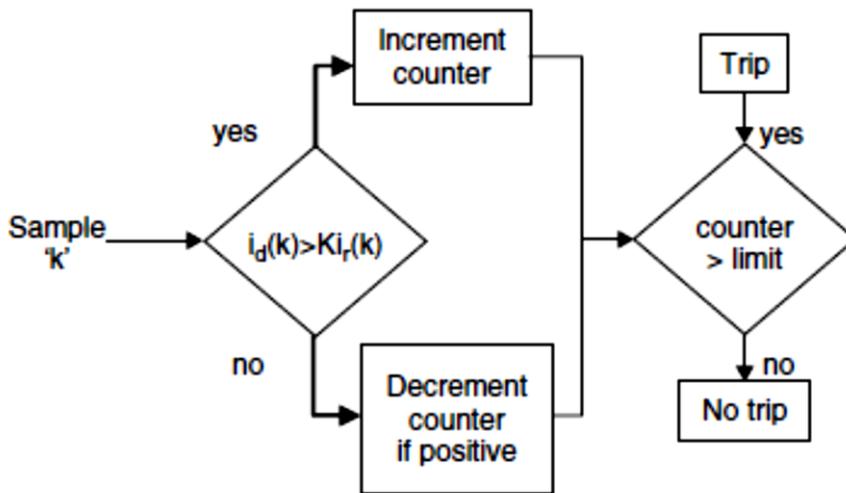


Рисунок 3.7. Блок-схема відсоткового диференціального реле, що базується на дискретних вимірюваннях. Для спрацювання лічильник повинен перевищити певне значення. Логіка блокується при виявленні насичення.

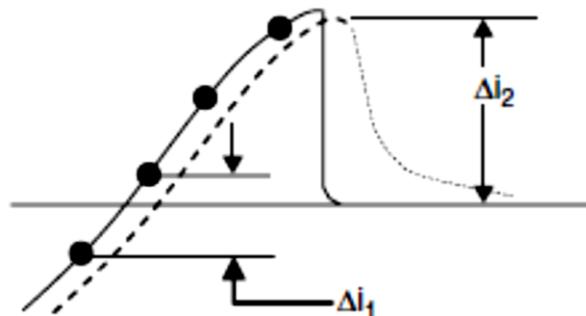


Рисунок 3.8. Логіка визначення насичення ТС (трансформатора струму). Фільтр згладжування впливає на рівень налаштувань, необхідний для цієї логіки.

Диференціальний реле, що базується на дискретизації, має бути вимкнено, як тільки один із трансформаторів струму (ТС) насичується.

Як згадувалося раніше, початок насичення можна виявити за допомогою функції моніторингу перехідних процесів. Альтернативно, можна перевірити зміну вторинного струму за один інтервал дискретизації (див. Рисунок 3.8).

$\Delta I_1$  - це зміна струму під час пошкодження, коли ТС не насичений. Це значення завжди менше за деяке значення, що визначається максимальним струмом короткого замикання на шинах. Якщо найбільший очікуваний симетричний струм короткого замикання на шинах від лінії живлення дорівнює  $\Delta I_f$ , тоді

$$|\Delta i_r| < \sqrt{2i_f} \times 2 \sin \frac{\omega \Delta t}{2} = \Delta i_{\max} \quad (3.6)$$

де  $\Delta T$  – інтервал дискретизації. Коли відбувається насичення трансформатора струму (ТС), зміна струму стає набагато різкішою, і перевірка  $\Delta i$  на кожному відліку може бути використана для виявлення початку перехідного процесу як що:

$$\begin{aligned} |\Delta i_k| &< M \Delta i_{\max}' \quad \text{без насичення} \\ &< M \Delta i_{\max}' \quad \text{початок насичення} \end{aligned} \quad (3.7)$$

де  $M$  є відповідним коефіцієнтом запасу, який потрібно встановити дещо більшим за 1,0. Після виявлення початку насичення, диференційний алгоритм на основі вибірок буде вимкнено. Анти-аліасингові фільтри пом'якшують колапс вторинного струму, коли ТТ (трансформатор струму) переходить у насичення, як показано пунктирною лінією на рисунку 3.8.

Цей ефект необхідно враховувати, щоб перевірити, чи може бути корисним тест, визначений нерівності в Рівнянні (3.12). Очевидно, що цей ефект згладжування більш виражений, коли використовуються низькі частоти дискретизації: вони вимагають нижчих частот зрізу в антиаліасинговому фільтрі. Одним із рішень цієї проблеми може бути використання вищої частоти дискретизації – насправді, це завжди має бути метою для отримання покращення швидкості реагування всіх реле. Вищі частоти дискретизації також дадуть значно більше зразків до початку насичення в додатку релейного захисту шин. Альтернативно, можна отримувати зразки нефільтрованих струмів (тобто без антиаліасингових фільтрів), щоб визначити початок насичення. Ще одна можливість полягає у використанні аналогових схем, які

б забезпечували тригер, що вказує на початок насичення ТС. Цифрова схема-імітатор також виконуватиме ту ж функцію. Повернення ТС до ненасиченого стану слід підтвердити чистотою його вихідного сигналу. Знову ж таки, це можна зробити за допомогою функції моніторингу перехідних процесів.

Зовсім інший підхід до захисту шин може бути реалізований шляхом застосування традиційного фазового порівняння або направлено порівняльного релейного захисту. Напрямок струму відносно напруги поляризації або відповідний залишковий струм може бути використаний для визначення, чи всі струми ліній, підключених до шини, надходять у шину, що вказує на наявність пошкодження. Аналогічно, можна використовувати початок півперіоду поточної хвилі для ініціювання фазового порівняння між усіма струмами, підключеними до шини. Оскільки для визначення фазового співвідношення використовується лише початок півперіоду струму, факт насичення одного з ТС не викликає безпосереднього занепокоєння. Хоча такі схеми дозволяють успішно працювати при наявності раннього насичення ТС, захист, який вони забезпечують, не є таким чутливим, як належний диференціальний захист, який використовує як інформацію про величину, так і про фазу. Нарешті, слід пам'ятати, що значна частина контролю за конфігурацією шин та схемами перемикання часто є частиною систем захисту шин. Ці функції набагато простіші в комп'ютерній системі захисту шин.

### **Висновок по третьому розділу.**

У розділі розглянуто алгоритми захисту пристроїв, де доцільна відсоткова диференціальна характеристика. У захисті силових трансформаторів фундаментальним питанням є забезпечення функції стримування, здатної розпізнавати умови кидка струму намагнічування та перезбудження. Алгоритми гармонійної стримуючої дії диференціального захисту трансформатора обчислюють гармоніки струмових сигналів. Обчислення ДПФ другої та п'ятої гармоніки струму стримування для кожної фази можуть бути практичними за умови правильного вибору частоти дискретизації.

Алгоритми для трансформаторів, які використовують вимірювання напруги шини, можливі в інтегрованій системі захисту підстанції. Безпосереднє використання напруги шини як стримуючого фактору (стримування при високій напрузі) є можливим і створює потенційно швидший алгоритм, ніж алгоритм гармонійної стримуючої дії. Вимірювання напруги шини також можуть бути використані для визначення нахилу характеристики потоку-струму трансформатора. Отриманий алгоритм значно простіший, ніж обчислення Фур'є, необхідні для обчислення гармоніки або фази струму та напруги. Нарешті, хоча захист машин і шин ще не настільки розвинений, як релейний захист ліній електропередачі, але обговорено деякі з існуючі реле, які були розроблені або досліджуються.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Впровадження комп'ютерного релейного захисту значно покращило ефективність та надійність захисту енергетичного обладнання, зокрема трансформаторів, машин та шин. На відміну від традиційних електромеханічних реле, комп'ютерні системи дозволяють реалізувати складні алгоритми, адаптивні налаштування та забезпечують швидку та точну діагностику аварійних режимів.

Для трансформаторів комп'ютерний захист дає можливість ефективно виявляти міжвиткові замикання, диференційні ушкодження та перевантаження, мінімізуючи пошкодження та час простою. Захист генераторів та двигунів завдяки комп'ютерній технології став більш чутливим до внутрішніх несправностей, забезпечуючи швидке відключення обладнання при виникненні небезпечних режимів. Щодо захисту шин, то комп'ютерні системи дозволяють реалізувати високошвидкісні диференційні схеми, що забезпечують селективне відключення ураженої секції без переривання живлення непов'язаних ділянок.

В цілому, використання комп'ютерного релейного захисту сприяє підвищенню стабільності енергосистеми, зменшенню збитків від аварійних режимів та оптимізації процесів управління та моніторингу електроенергетичного обладнання. Подальший розвиток комп'ютерних технологій у цій сфері відкриває нові можливості для створення більш інтелектуальних та ефективних систем захисту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rockefeller, G. D. (1969) Fault protection with a digital computer, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems (IEEE Trans. on PAS), vol. 88, no. 4, pp. 438–461.
2. Mann B. J. and Morrison, I. F. (1971) Digital calculation of impedance for transmission line protection, IEEE Trans. on PAS, vol. 90, no. 1, pp. 270–279.
3. Poncelet, R. (1972) The use of digital computers for network protection, CIGR'E Paper no. 32-08.
4. Takagi, T., Baba, J., Uemura K., and Sakaguchi, T. (1977) Fault protection based on traveling wave theory – Part I: Theory, IEEE Summer Power Meeting, Mexico City, paper no. A77 750-3.
5. Dommel, H. W. and Michels, J. M. (1978) High speed relaying using travelling wave transient analysis, IEEE PES Winter Power Meeting, New York, January 1978, Paper No. A78 214-9.
6. Cory B. J. and Moont, J. F. (1970) Application of digital computers to busbar protection, IEEE Conference on the Application of Computers to Power System Protection and Metering, Bournemouth, England, May 1970, pp. 201–209.
7. Sykes, J. A. and Morrison, I. F. (1972) A proposed method of harmonic restraint differential protection of transformers by digital computers, IEEE Trans. on PAS, vol. 91, no. 3, pp. 1266–1272.
8. Sachdev, M. S. and Wind, D. W. (1973) Generator differential protection using a hybrid computer, IEEE Trans. on PAS, vol. 92, no. 6, pp. 2063–2072.
9. Phadke, A. G., Horowitz, S. H., Thorp, J. S. (1983) Integrated Computer system for protection and control of high voltage substations, CIGR'E Colloquium, Tokyo, Japan, November 1983.

10. Deliyannides J. S. and Udren, E. A. (1985) From concepts to reality: the implementation of an integrated protection and control system, *Developments in Power System Protection*, IEE Conference Publication no. 249, London, April 1985, pp. 24–28.
11. North American Reliability Council, System Disturbance, 1983, etc. Research Park, Terhune Road, Princeton, New Jersey.
12. Surge Withstand Capability (SWC) Tests for Protective Relays and Relay Systems, P472/D9, C37.90.1-198x. Draft Document of the Power System Relaying Committee, June 8, 1987.
13. Surge Withstand Capability (SWC) Tests, ANSI C37.90a, 1974.
14. Kotheimer W. C. and Mankoff, L. L. (1977) Electromagnetic interference and solid-state protective relays, *IEEE Trans. on PAS*, vol. PAS-96, no. 4, pp. 1311–1317.
15. Habib M. and Marin, M.A. (1987) A comparative analysis of digital relaying algorithms for the differential protection of three-phase transformers, PICA, May 1987, Montreal, Canada.
16. Einvall C.H. and Linders, J.R. (1975) A three-phase differential relay for transformer protection, *IEEE Trans. on PAS*, vol. 94, no. 6, pp. 1971–1980.
17. Harder, E.L. and Marter, W.E. (1948) Principles and practices of relaying in the United States, *AIEE Transactions*, vol. 67, Part II, pp. 1005–1022.
18. Benmouyal, G. An adaptive sampling interval generator for digital relaying (1989) *IEEE Power Engineering Review*, vol. 9, issue 7, pp. 45–46.
19. Sachdev, M.S. Computer Relaying, *IEEE Tutorial*, Special Publication no. 79 EH0148-7- PWR, 1979, Chapter 6.
20. Adamiak, M.G., Dhruba, P.D., Gardell, J., et al. (1993) Performance assessment of a new digital subsystem for generator protection, Twentieth Annual Western Protective Relay Conference, October 19–21, 1993, Spokane, Washington.
21. Applied Protective Relaying (1976) Chapter 7, Westinghouse Electric Corporation.

22. Zocholl, S.E., Schweitzer III, E.O., and Aliaga-Zegarra, (1984) A. Thermal protection of induction motors enhanced by interactive electrical and thermal methods, Trans. Of IEEE on PAS, vol. PAS-103, no. 7, pp. 1749–1755.

23. Zocholl, S.E. Determining relay settings for induction motor stator and rotor protection using thermal models (1987) Conference on Computer Relaying, Blacksburg, Virginia.

24. Cory B.J. and Moont, J.F. Application of digital computers to busbar protection (1970) IEE Conference on the Application of Computers to Power System Protection and Metering, Bournemouth, England, pp. 201–209.