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

Кадошніков Ярослав Вадимович

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Аналіз та обґрунтування застосування біжучих хвиль релейними системами захисту електросистем
(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

Кадошніков Я. В.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Савченко Л.Г.
(прізвище, ім'я, по батькові)
к.і.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології
(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2025

АНОТАЦІЯ

Кадошніков Я. В. Аналіз та обґрунтування застосування біжучих хвиль релейними системами захисту електросистем. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2025.

Релейний захист із використанням біжучих хвиль (РЗБХ) є перспективним методом захисту електроенергетичних систем, особливо ліній електропередачі. Він ґрунтується на аналізі перехідних процесів, що виникають при виникненні пошкодження в мережі. Перевагою РЗБХ є його надзвичайно висока швидкість спрацювання, яка на порядок вища, ніж у традиційних методів захисту. Це дозволяє мінімізувати наслідки коротких замикань, зменшити ризик пошкодження обладнання та підвищити стійкість енергосистеми.

Ключові слова: релейний захист, біжучі хвилі, реле дистанційного захисту.

ABSTRACT

Kadoshnikov, Ya. V. Analysis and Justification of the Application of Traveling Waves by Relay Protection Systems of Electrical Power Systems. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics – Polissia National University, Zhytomyr, 2024.

Relay protection using traveling waves (TWRP) is a promising method for protecting electrical power systems, especially power transmission lines. It is based on the analysis of transient processes that occur when a fault occurs in the network. The advantage of TWRP is its extremely high speed of operation, which is an order of magnitude higher than traditional protection methods. This minimizes the consequences of short circuits, reduces the risk of equipment damage, and increases the stability of the power system.

Keywords: relay protection, traveling waves, distance relay protection.

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
РОЗДІЛ 3 РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ З ВИКОРИСТАННЯМ БІЖУЧИХ ХВИЛЬ	22
3.1 Біжучі хвилі в однофазних лініях	23
3.2 Біжучі хвилі в трифазних лініях	31
3.3 Реле дистанційного захисту на основі біжучої хвилі	34
Висновок по третьому розділу	36
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	37
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	38

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. Кадошніков Я. В.

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПРИСТРОЇВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ «СТУДЕНТСЬКІ ЧИТАННЯ – 2025» 30 жовтня 2025 року м. Житомир

2. Кадошніков Я. В, Зленко В. В.

ТЕХНОЛОГІЯ АКТИВНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ - СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ НЕСПРАВНОСТЕЙ Наукові читання – 2025: збірник тез доповідей науково-практичної конференції за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей. 23 квітня 2025 р. Житомир: Поліський національний університет, 2025. Том 2.

3. Кадошніков Я. В., Волошин В. О.

ПРАВИЛО КОРЕЛЯЦІЇ АГРЕГАЦІЇ ЗА ЧАСОМ В ЕНЕРГЕТИЦІ:СУТНІСТЬ ТА ЗНАЧЕННЯ «Біоенергетичні системи» IX Міжнародна науково-практична конференція, Житомир, Україна, 19-20. 11. 2025

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.

1.2 Історичний контекст

Одне з найранніших 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 апаратурним захистом за принципом диференціального захисту[6–8]. Ці ранні посилання 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 комплексі1 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 підстанційні мережі, можливо, навіть у системну мережу з використанням швидких широкосмугових комунікаційних мереж. Ранішні роботи з цієї теми визнавали кілька переваг, які випливають 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 зросла. 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 звичних 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. Оптоволоконні лінії завдяки своїй стійкості до електромагнітних перешкод (EMI) 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 оптоволоконних каналів та інтегруватися з комп’ютерними системами управління та моніторингу підстанції. Власне, без комп’ютерного захисту цифрові трансдюсери та оптоволоконні 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 EMI 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.

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.

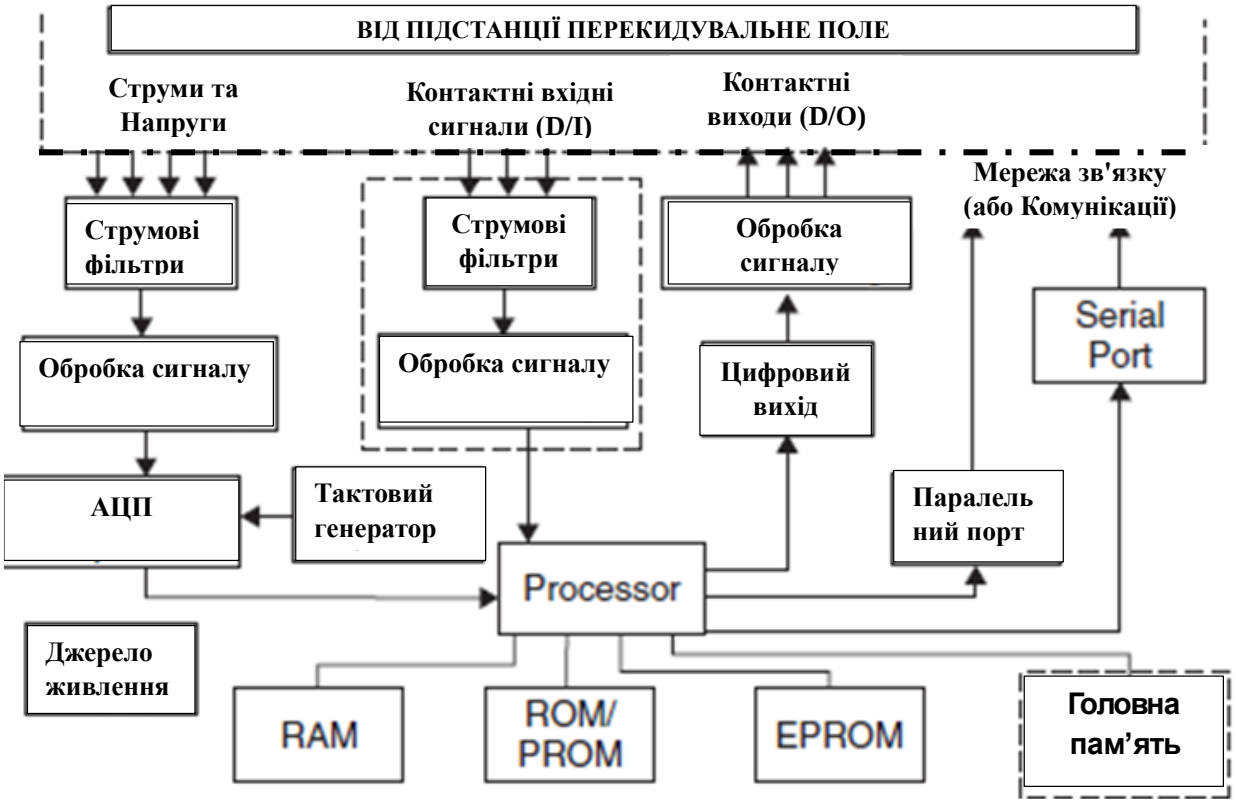

Рисунок 2.1. Підсистеми релейного комп'ютера. Пунктирна лінія зверху показує межу відкритого розподільчого пристрою. Все інше обладнання знаходиться всередині будівлі управління.

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 носієві. 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 (CTs 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 ±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 входовою 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 опірного дільника напруги, розрахованого на забезпечення достатнього опору джерела для подальших етапів фільтрів та підсилювачів.

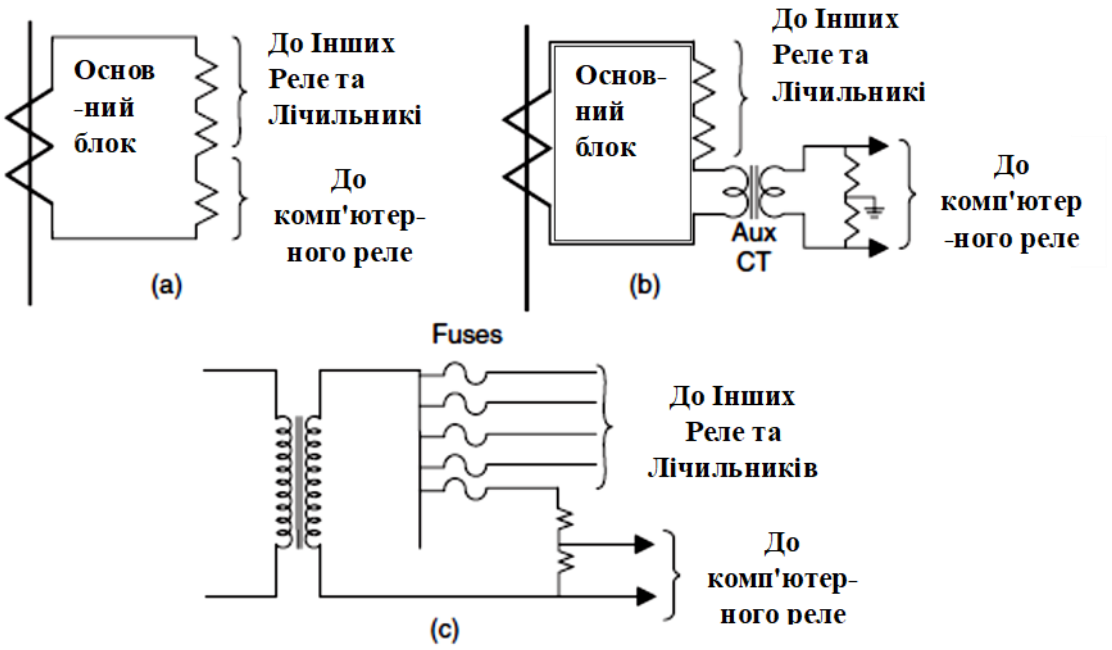

Рисунок 2.2 Масштабування сигналів струму та напруги для подачі на реле. (a) Пряме підключення у вторинній обмотці основного ТС. (b) Використання допоміжного ТС. (c) Трансформатор напруги та потенційний дільник.

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 імпульсних перенапруг 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 перенапруг 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 зразкування, 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 зразкування 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.

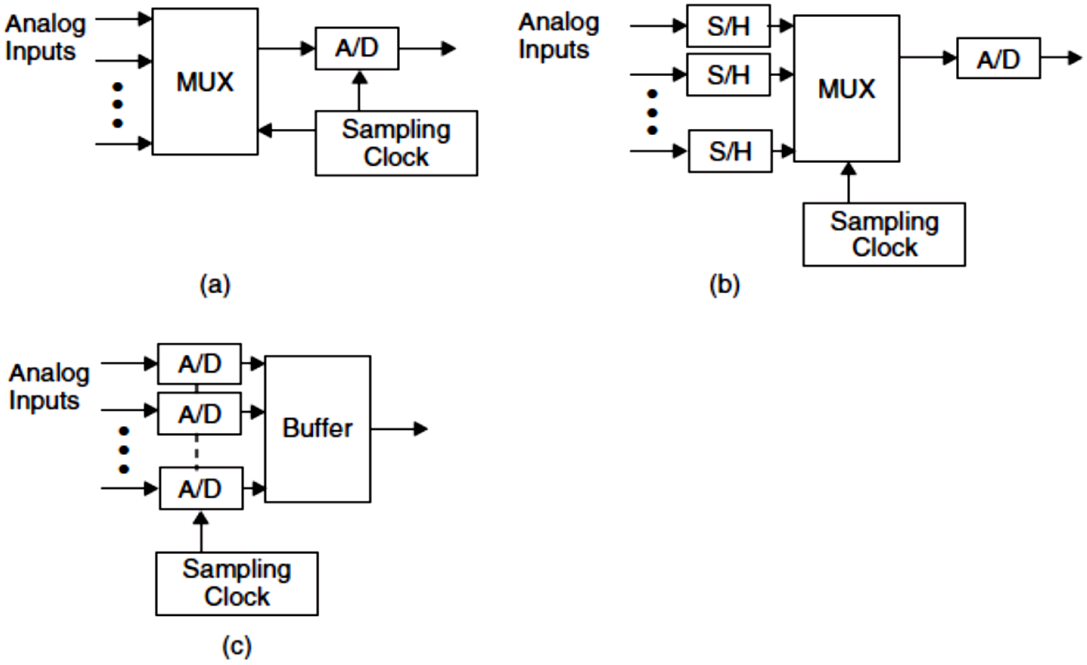

Рисунок 2.3 Процес дискретизації множинних сигналів та його організація. (a) Один АЦП з мультиплексованим входом. (b) Схема вибірки-зберігання, додана до кожного каналу. (c) Окремий АЦП для кожного каналу.

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 BDC та ±15 BDC. 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 ±10 В, антиаліас-фільтри; можливе застосування допоміжних CT 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 ±15 В для аналогових), вхід ~125 BDC; 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.

РОЗДІЛ 3

РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ З ВИКОРИСТАННЯМ БІЖУЧИХ ХВИЛЬ

Релейний захист із використанням біжучих хвиль (РЗБХ) є перспективним методом захисту електроенергетичних систем, особливо ліній електропередачі. Він ґрунтується на аналізі перехідних процесів, що виникають при виникненні пошкодження в мережі. При виникненні короткого замикання генеруються електромагнітні хвилі, які розповсюджуються лінією передачі у двох напрямках від місця пошкодження. РЗБХ використовує аналіз форми, амплітуди та часу прибуття цих хвиль для швидкої та селективної ідентифікації пошкоджень.

Перевагою РЗБХ є його надзвичайно висока швидкість спрацювання, яка на порядок вища, ніж у традиційних методів захисту. Це дозволяє мінімізувати наслідки коротких замикань, зменшити ризик пошкодження обладнання та підвищити стійкість енергосистеми. Крім того, РЗБХ є менш чутливим до змін режиму роботи мережі та більш надійним в умовах складних перехідних процесів.

Попри значні переваги, РЗБХ має і певні недоліки. Основними з них є висока вартість обладнання та складність алгоритмів обробки сигналів. Точність роботи РЗБХ залежить від точності вимірювань і правильності параметрів лінії електропередачі. Постійний розвиток технологій обробки сигналів та вдосконалення вимірювальної апаратури сприяють подоланню цих недоліків та розширенню сфери застосування РЗБХ в енергосистемах майбутнього. Таким чином, РЗБХ представляє собою значний крок вперед у розвитку технологій релейного захисту, забезпечуючи швидший, більш надійний та ефективний захист електроенергетичних мереж.

3.1 Біжучі хвилі в однофазних лініях

Будь-яке електричне збурення поширюється вздовж лінії електропередачі у вигляді біжучої хвилі. В однофазних лініях електропередачі хвилі є одномодовими – тобто, вони мають єдину швидкість поширення та характеристичний імпеданс – тоді як у трифазній лінії електропередачі існує принаймні дві різні модальні швидкості та характеристичні імпеданси. У будь-якому випадку, виникнення пошкодження породжує ці біжучі хвилі, які поширюються від точки пошкодження до терміналів лінії, де розташовані реле. Можливо спроектувати реле, які використовують ці явища поширення для виявлення наявності пошкодження та визначення місця пошкодження. Оскільки біжучі хвилі є найранішим можливим сигналом для реле про те, що відбулось пошкодження, ці реле мають потенціал стати найбільш швидкодіючими. З іншого боку, явища біжучих хвиль, як правило, містять високочастотні сигнали (від кількох кілогерц до мегагерц, залежно від місця пошкодження), і, отже, система збору даних (АЦП) повинна мати відповідну високу смугу пропускання. На даний момент мікрокомп'ютерним системам було б важко обробляти завдання реле, що використовують біжучі хвилі, за винятком випадків дуже довгих ліній, які створюють великі затримки поширення. Тим не менш, реле, що використовують біжучі хвилі, представляють собою новий та цікавий розвиток в галузі релейного захисту, і хоча вони можуть не бути "комп'ютерними реле" в тому сенсі, як імпедансні реле.

Розглянемо однофазну (два провідники у вільному просторі) лінію електропередачі, показану на рисунку 3.1. Рисунок 3.1(а) показує умови на лінії до пошкодження. Пошкодження виникає в точці F, де напруга до пошкодження становить $-e_F$. Виникнення пошкодження можна змоделювати шляхом накладання на доаварійні напруги та струми мережі напруг і струмів, створюваних аварійною мережею, що складається з єдиного джерела з величиною $-e_F$ в точці пошкодження. Реле розташоване в точці R і призначене для вимірювання напруг і струмів пошкодження, тобто мережі, зображеної на

рисунку 3.1(b). Іншими словами, реле відчуває відхилення струмів і напруг від їхніх доаварійних значень.

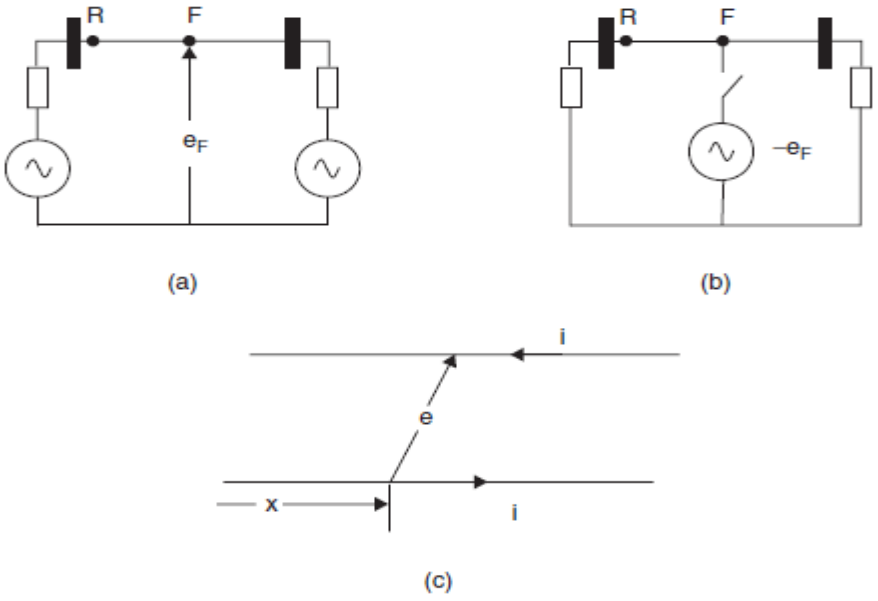

Рис. 3.1 Однофазна лінія передачі. Поширення хвилі, ініційоване замиканням. (a) Початкові умови. (b) Модель замикання. (c) Хвильові явища

Розглянемо точку на відстані x, виміряній від місця розташування реле вздовж лінії передачі. Напруга та струм у точці x підпорядковуються диференціальним рівнянням у частинних похідних [1].

$$\frac{de}{dx} = -L\frac{di}{dt}$$
$$\frac{di}{dx} = -C\frac{de}{dt} \qquad (3.1)$$

де L і C – індуктивність і ємність лінії на одиницю довжини. Опором лінії нехтуємо. Рішення рівняння (9.1) є

$$e(x,t) = e_f(x - vt) + e_r(x - vt)$$
$$s(x,t) = \frac{1}{Z}e_f(x - vt) + \frac{1}{Z}e_r(x - vt) \qquad (3.2)$$

де $Z = \sqrt{(L/C)}$ — хвильовий опір лінії передачі, а

$v = \sqrt{1/(L/C)}$ — швидкість поширення.

Приклад 3.1

Повітряна лінія з двома провідниками, що мають рівні радіуси 1 см і відстань між провідниками 10 метрів, має L та C, що задаються виразом:[2]

$$L = 4 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{0.779} \text{ Гн/м} = 28.63 \times 10^{-7} \text{ Гн/м}.$$

та

$$C = n \frac{\pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln(\frac{D}{r})} = 4.025 \times 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}.$$

Для цієї лінії швидкість поширення

$$v = 2.95 \times 10^{-7} \text{ м/с}$$

і хвильовий опір

$$Z = \sqrt{\frac{(28.63 \times 10^{-7})}{(4.02 \times 10^{-12})}} \text{ Ом}.$$

Слід зазначити, що часто сталі лінії (L і C) однофазної лінії виражаються в "пофазних" величинах – тобто, між кожним провідником і нейтральною площиною, розташованою посередині між двома провідниками. У такому випадку L стає вдвічі меншою, а C стає вдвічі більшою за значення, обчислені вище, швидкість поширення залишається незмінною, а хвильовий опір стає вдвічі меншим за значення, обчислене вище. Ця пофазна процедура корисна, оскільки вона безпосередньо веде до пофазної концепції в трифазній лінії. Розв'язок (3.2) рівняння (3.1) представляє собою два фронти біжучих хвиль: e_f, що рухається в позитивному напрямку x (пряма хвиля), і e_r, що рухається в негативному напрямку x (зворотна хвиля). Напруга і струми в будь-якій точці лінії складаються з цих прямої та зворотної складових:

$$e = e_f + e_r$$
$$i = i_f + i_r \tag{3.3}$$

Пряма та зворотна складові струмів пов'язані з відповідними складовими напруги через характеристичний імпеданс Z. На рисунку 9.2 показано ці зв'язки в наочній формі для деяких умовно обраних форм e_f та e_r. Ці хвилі поширюються зі швидкістю v, а сумарна напруга та струм у будь-якій точці лінії передачі визначаються суперпозицією. Як згадувалося раніше, ми знехтували опором ліній передачі, а також залежністю L від частоти хвилі напруги. Обидва ці ефекти є відносно незначними та викликають загасання та спотворення форми хвилі під час їх поширення вздовж лінії.[3]

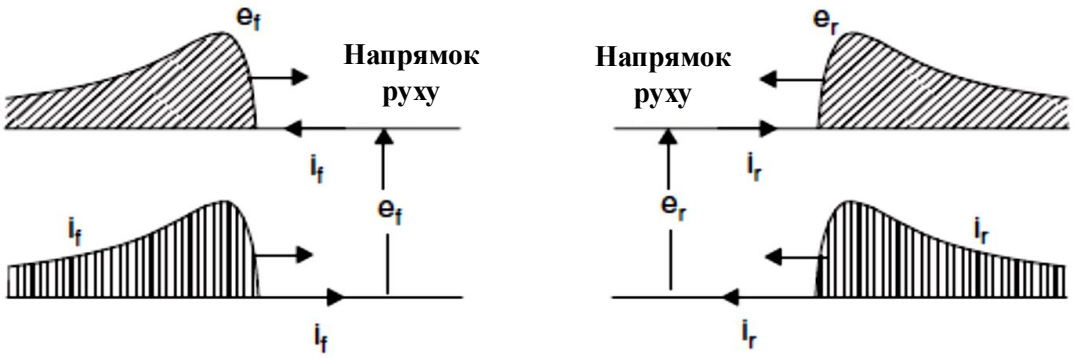

Рисунок 3.2 Біжучі хвилі напруги та струму

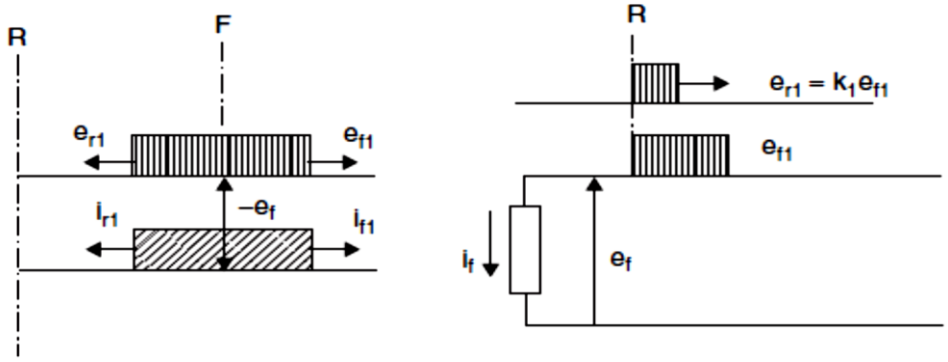

Рисунок 3.3. Біжучі хвилі, що виникають внаслідок пошкодження. Індекс f позначає пряму біжучу хвилю, а індекс r – зворотну біжучу хвилю відносно додатного напрямку x.

Розглянемо виникнення пошкодження, як показано на рисунку 3.2(b). Напруга пошкодження, будучи частиною синусоїди промислової частоти, є приблизно постійною (рівною $-e_F$), і вона запускає дві хвилі, обидві (приблизно) прямокутної форми і з амплітудою $-e_F$, які віддаляються від точки пошкодження (див. рисунок 3.3). Ці хвилі відбиваються від будь-якої нерівності (включно з клемою, де розташоване реле). Якщо k_a є коефіцієнтом відбиття, що застосовується на клемі a, вхідна хвиля e_{r1} викликає відбиту хвилю, що рухається в прямому (збільшення x) напрямку, з відповідним струмом:

$$e_{f2} = k_a e_{r1}$$
$$i_{f2} = k_a i_{r1} = e_{f2}/Z \qquad (3.4)$$

Напруги та струми на кінці лінії (на навантаженні) дорівнюють (e_t, i_t), де

$$e_t = e_{r1} + e_{f2} = (1 + k_a)e_{r1}$$
$$i_t = -i_{r1} + i_{f2} = (1 + k_a)i_{r1} \qquad (3.5)$$

Значення коефіцієнта відбиття k_a залежить від навантаження: якщо навантаження є ідентичною лінією передачі, то відбиття відсутні, і k_a дорівнює нулю. Якщо навантаженням є розімкнений контур, то коефіцієнт відбиття дорівнює +1, а при короткому замиканні коефіцієнт відбиття дорівнює −1.0.

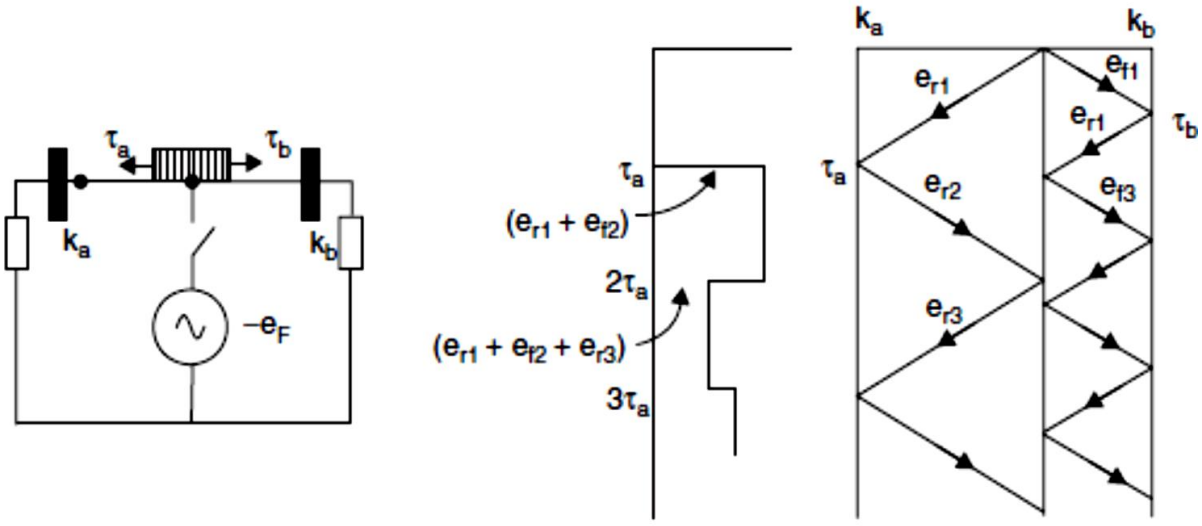

Рисунок 3.4 Біжучі хвилі та діаграма ґратки Бевлі для двополюсної лінії.

Для навантажень, що містять індуктивні або ємнісні кола, коефіцієнт відбиття є оператором (тобто він є функцією змінної Лапласа s). Якщо навантаженням є інші лінії передачі, то напруга e_t і струм e_t запускаються у вигляді хвиль на цих лініях, щоб відбитися далі на їхніх власних навантаженнях. Весь хвильовий потяг, спочатку запущений несправністю, таким чином рухається вгору і вниз по мережі, фрагментований відбиттями, поки не розсіється через втрати і не встановиться новий сталий стан. Коли коефіцієнти відбиття є дійсними числами, дуже зручним методом візуалізації цього явища є ґратчаста діаграма Б'юлі.[4] Розглянемо схему, показану на рисунку 3.4. Місце пошкодження знаходиться на відстані d_a від клеми a. Час затримки поширення для двох сегментів становить t_a (= d_a /v) і t_b (= b/v) відповідно. У точці пошкодження коефіцієнт відбиття дорівнює −1.0 (оскільки передбачається, що пошкодження має нульовий імпеданс). Отже,

$$e_{f1} = e_{r1} = e_{rF}$$
$$e_{f2} = k_a e_{r1} = e_{rF}, \quad e_{r2} = k_b e_{r1}$$
$$e_{r3} = -e_{f2,} \quad e_{f3} = -e_{r2} \tag{3.6}$$

Ці послідовні відбиття проілюстровано ґратчастою діаграмою на рисунку 3.4. Напруги та струми на терміналі a (як їх бачить реле, розташоване на цьому терміналі) можна отримати, додавши всі компоненти на терміналі a в ґратчастій діаграмі. Наприклад, припускаючи $k_a = -0.5$, і $-e_F = 1.0$, форми сигналів напруги та струму на терміналах a, b та F показані на рисунку 3.5.

Якщо енергосистема за місцем розташування реле (термінал a) складається з інших ліній електропередачі з власними кінцевими навантаженнями, вони, в свою чергу, матимуть подібні ґратчасті діаграми, що представляють відбиття на їх терміналах. Відбиття, які повертаються до терміналу a, знову впливатимуть на нього і створюватимуть хвилі, що поширюються по пошкодженій лінії.

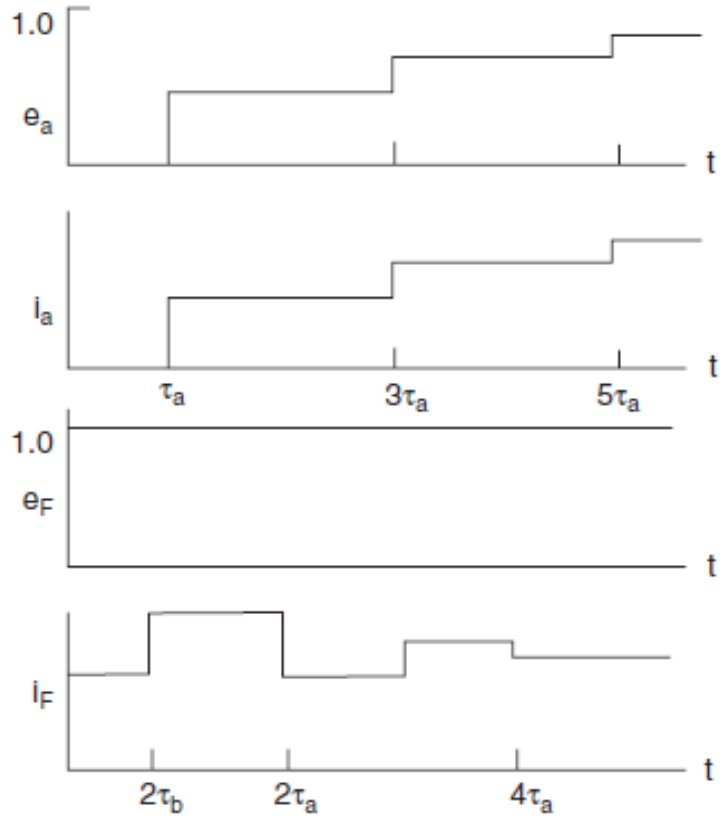

Рисунок 3.5. Форми кривих напруги та струму на лінійному виводі та в точці пошкодження внаслідок біжучих хвиль

Розглянемо одну таку лінію a-c на рисунку 3.6. Також припускається, що інша лінія нескінченної довжини існує паралельно лінії a-c. (Довжина цієї лінії

вважається нескінченною, щоб спростити наше обговорення). Коефіцієнти відбиття в точках c і a для хвиль, що поширюються по лінії a-c, розраховуються, як і раніше. Очевидно, що результуючі форми сигналів в точці a тепер набагато складніші.

Досі ми припускали, що напруга пошкодження $-e_F$ є постійною. Однак, в реальності, вона змінюється за синусоїдальним законом з частотою мережі. Якщо пошкодження відбувається на відстані 100 км від місця розташування реле, t_a становить приблизно 0,33 мсек, і синусоїду 60 Гц можна вважати постійною протягом декількох часів пробігу хвилі.

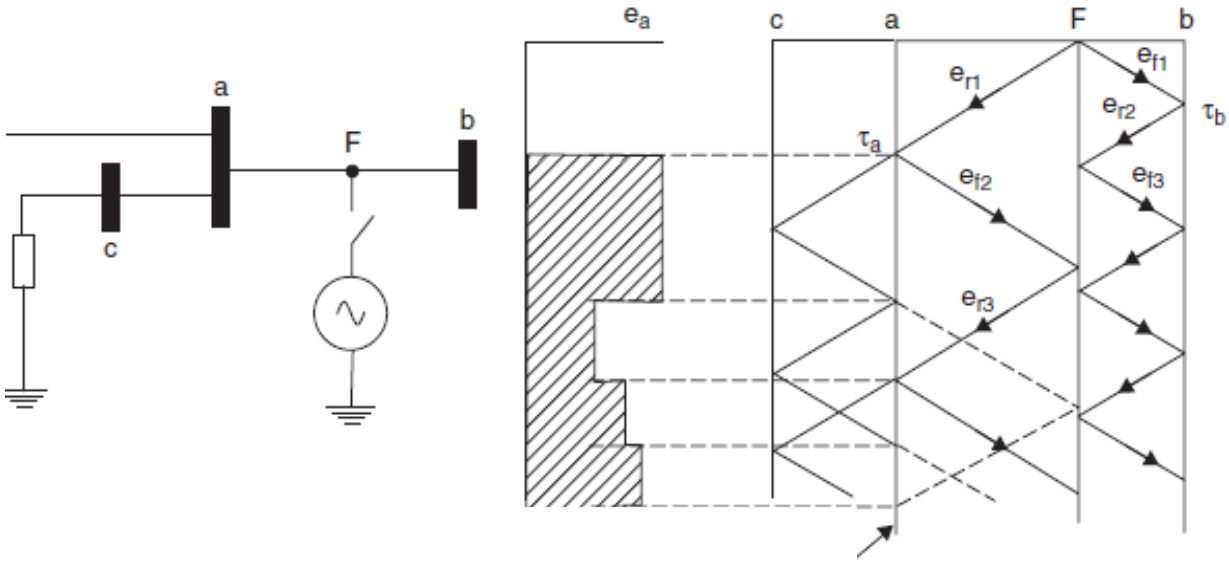

Рисунок 3.6. Багаторазові відбиття хвиль, створених пошкодженням у точці F. Для спрощення припускається, що лінія на шині a має нескінченну довжину. Інша лінія a-c закінчується на імпедансі навантаження.

Для пошкоджень, що виникають на менших відстанях, припущення про сталість e_F ближче до реальності. У будь-якому випадку, слід зазначити, що усталені напруги та струм у місці розташування реле є синусоїдальними, причому струм має затухаючу постійну складову, величина якої залежить від кута виникнення пошкодження. Струм і напруга в місці розташування реле наростають відповідно до міркувань, пов'язаних з біжучими хвилями, які

обговорювалися досі, і в кінцевому підсумку переходять у свої відповідні усталені значення.

3.2 Біжучі хвилі в трифазних лініях

Трифазні лінії електропередачі складаються з фаз a, b і c, і системи заземлення, що складається з землі та грозозахисних тросів (якщо вони присутні). Як і у випадку однофазних ліній електропередачі, напруги та струми на відстані x від клеми лінії пов'язані диференціальними рівняннями в частинних похідних.

$$\frac{\partial}{\partial x}\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} L_s L_m L_m \\ L_m L_s L_m \\ L_m L_m L_s \end{bmatrix}\frac{\partial}{\partial x}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$
$$\frac{\partial}{\partial x}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} C_s C_m C_m \\ C_m C_s C_m \\ C_m C_m C_s \end{bmatrix}\frac{\partial}{\partial x}\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

У Рівнянні (3.7) ми припустили, що лінія електропередачі транспонована. Власна індуктивність кожної фази дорівнює L_s Гн/м, а взаємна індуктивність між будь-якими двома фазами – L_m Гн/м. Аналогічно, ємність між кожною фазою та землею дорівнює C_s Ф/м, а ємність між будь-якими двома фазами – C_m. Зазвичай величини L_s, L_m, C_s, C_m виражаються через їх значення позитивної та нульової послідовностей [4] (які є власними значеннями матриць L і C відповідно):

$$L_s = \frac{1}{3}(L_0 + 2L_1)$$
$$L_m = \frac{1}{3}(L_0 + L_1)$$
$$C_s = \frac{1}{3}(C_0 + 2C_1) \quad (3.8)$$
$$C_s = \frac{1}{3}(C_1 + 2C_0)$$

Відповідне представлення схеми показано на рисунку 9.7. Зауважте, що на рисунку 3.7(a) показано ємності між провідниками при з'єднанні зіркою, тоді як на рисунку 3.7(b) вони показані при з'єднанні трикутником. Рівняння (9.6) мають розв'язок у вигляді біжучої хвилі в модальних величинах. Нехай 0, α, β будуть компонентами Кларка напруги і струмів:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} e_0 \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

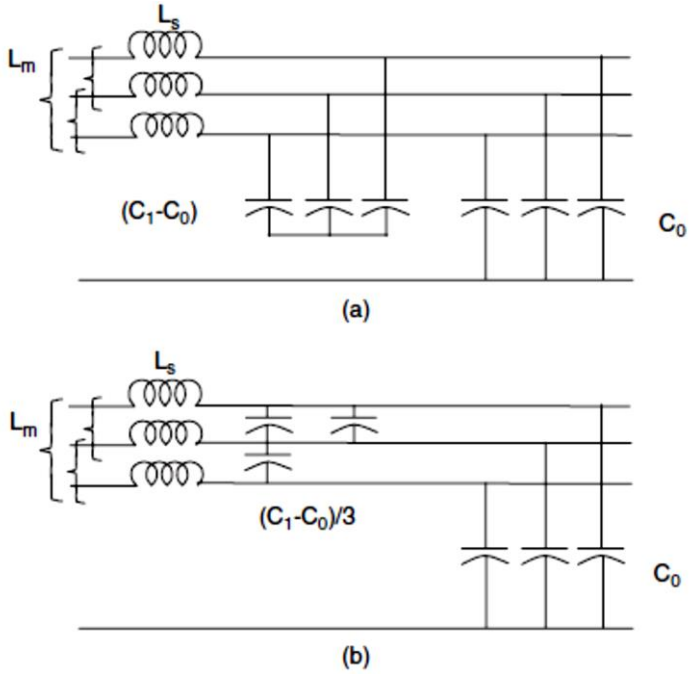

Рисунок 3.7 Багатофазна модель лінії електропередачі. (a) Схема з'єднання зіркою. (b) Схема з'єднання трикутником.

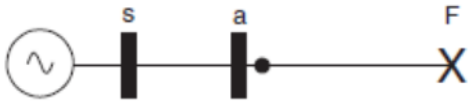

Рисунок 3.8. Однолінійна схема системи для врахування біжучих хвиль

У цьому випадку розв'язок рівняння (3.7) для напруги і струмів у будь-якій точці трифазної лінії задається

$$e_0 = e_{f0}(x - v_0 t) + e_{r0}(x - v_0 t)$$
$$e_\alpha = e_{f\alpha}(x - v_0 t) + e_{r\alpha}(x - v_0 t)$$
$$e_\beta = e_{f\beta}(x - v_0 t) + e_{r\beta}(x - v_0 t)$$

(3.10)

$$i_0 = i_{f0} \text{-} i_{r0}$$
$$i_\alpha = i_{f\alpha} \text{-} i_{r\alpha}$$
$$i_\beta = i_{f\beta} \text{-} i_{r\beta} \qquad (3.11)$$

де

$$\frac{e_{f0}}{i_{f0}} = \frac{e_{r0}}{i_{r0}} = Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$
$$\frac{e_{f\alpha}}{i_{f\alpha}} = \frac{e_{r\alpha}}{i_{r\alpha}} = Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$$
$$\frac{e_{f\beta}}{i_{f\beta}} = \frac{e_{r\beta}}{i_{r\beta}} = Z_1 \qquad (3.12)$$

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$$
$$v_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \qquad (3.13)$$

Іншими словами, фазні напруги та струми слід розглядати як складені з компонентів 0, α, β. Кожна з цих компонентів представляє режим поширення рівняння. 0-режим має власний хвильовий опір і швидкість поширення, які відрізняються від відповідних для режимів α і β.

3.3 Реле дистанційного захисту на основі біжучої хвилі

Розглянемо однофазну лінію електропередачі з реле в точці a та пошкодженням у точці F, як показано на рисунку 3.8. Як пояснено в розділі 3.2, виникнення пошкодження викликає появу біжучих хвиль, які поширюються від місця пошкодження. Хвилі відбиваються від усіх нерівностей згідно з ґратчастою діаграмою на рисунку 3.4. Якщо б ми знайшли хвилю, яка пішла від місця розташування реле в напрямку пошкодження і запустили таймер, коли хвиля проходила через місце розташування реле, ця хвиля відбилася б від пошкодження і повернулася б до місця розташування реле. Коли хвиля перетинає місце розташування реле у зворотному напрямку, таймер зупиняється. Показання таймера в такому випадку відповідатимуть подвоєному часу, необхідному для проходження відстані до місця пошкодження.

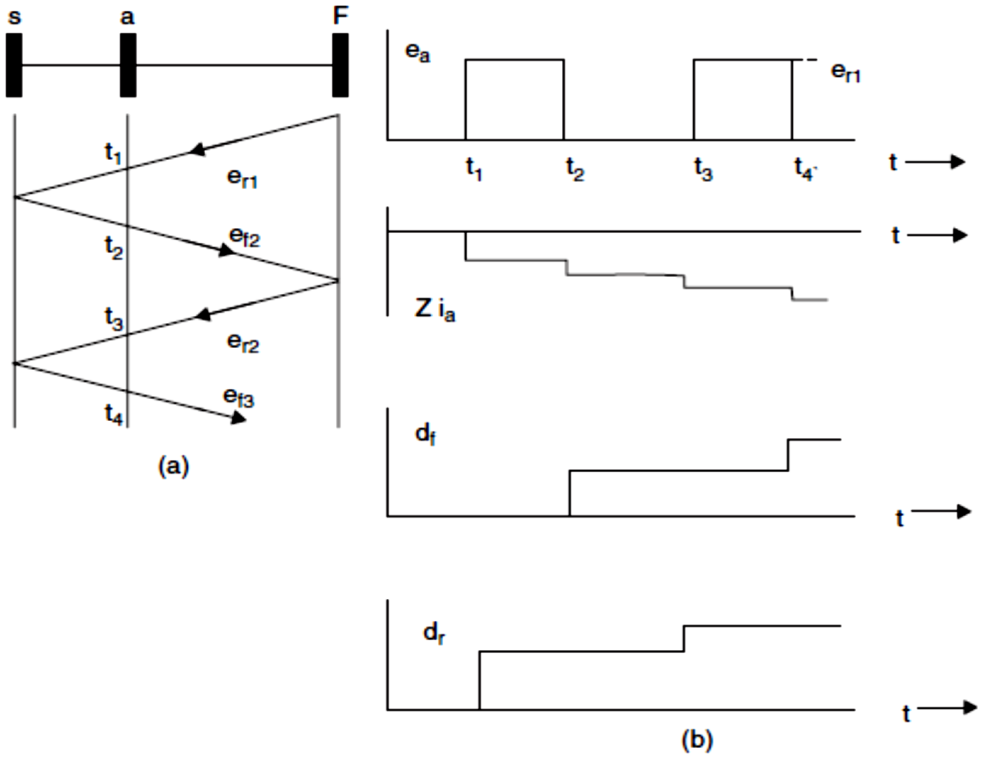

Рисунок 3.9. Напруга, струм і дискримінантні функції для випадку пошкодження. (а) Схема системи та ґратчаста діаграма. (б) Осцилограми. Зворотна дискримінантна функція приходить до місця розташування реле першою, оскільки вона пов'язана з хвилею, що поширюється до реле від місця пошкодження.

Оскільки швидкість розповсюдження хвилі відома, відстань до місця пошкодження може бути розрахована. Якщо ми припустимо, що відстань sa становить приблизно половину af на рисунку 3.8, маємо місце пошкодження з нульовим імпедансом і джерело нескінченної потужності короткого замикання в шині s. Тоді біжучі хвилі, що спостерігаються реле, можна отримати з гратчастої діаграми, показаної на рисунку 3.9. У момент часу t2 хвиля, відбита від джерела за реле, перетинає реле і прямує до місця пошкодження. У момент часу t3 ця хвиля відбивається від місця пошкодження і перетинає розташування реле у зворотному напрямку. Отже, (t3 – t2) дорівнює подвійному часу проходження між розташуванням реле та місцем пошкодження. Функції дискримінації прямого та зворотного напрямків для цього випадку також показані на рисунку 3.9. Реле повинно отримати можливість запустити свій таймер у момент часу t_2, коли спрацювання d_f вказує на прибуття хвилі після (або одночасно) зі спрацюванням d_r. Це, як було зазначено в попередньому розділі, вказує на пошкодження в прямому напрямку. Після запуску таймера його потрібно зупинити, коли d_r показує форму хвилі, подібну до тієї, яка перетнула розташування реле у момент часу t_2.

Форми прямокутних хвиль, показані на рисунку 3.9, виникають за припущення нульового опору в місці замикання й у джерела. Якщо джерело індуктивне, відбиті від джерела хвилі будуть експоненційними функціями, як показано на рисунку 3.10. Вплив опору дуги при замиканні (коли він присутній) полягає в збільшенні коефіцієнта відбиття напруги від −1,0, що відповідає прямому короткому замиканню, до значення, дещо ближчого до нуля залежно від опору дуги.

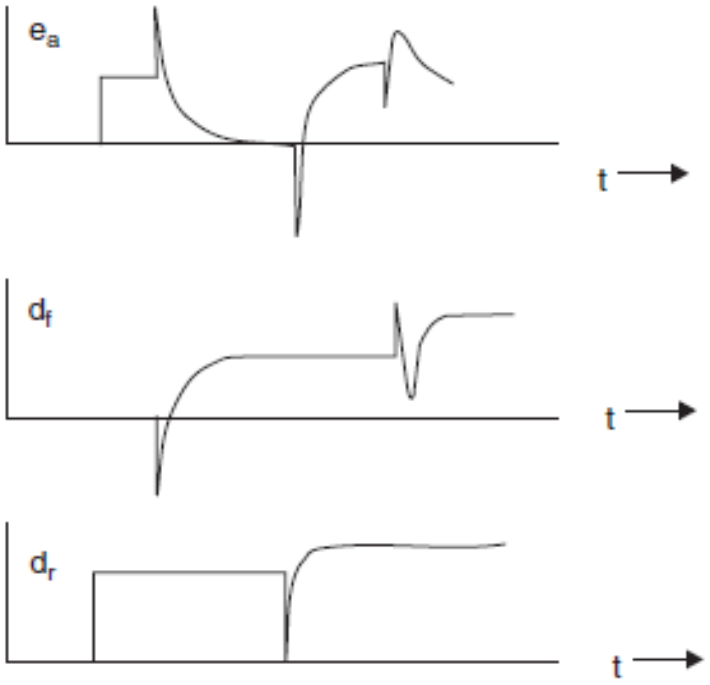

Рисунок 3.10 Дискримінантні хвильові функції для індуктивного навантаження

Висновок по третьому розділу

Релейний захист з використанням біжучих хвиль (РЗБХ) обіцяє суттєво швидший та селективний захист ліній електропередачі завдяки використанню ранніх сигналів від пошкодження.

Основна перевага: швидке спрацьовування, підвищена надійність у складних переходах та менша чутливість до режимів роботи мережі.

Основні недоліки: висока вартість обладнання та складність алгоритмів обробки сигналів; залежність від точності вимірювань та параметрів лінії.

У теорії дві ключові концепції: поширення біжучих хвиль у однофазних та трифазних лініях з урахуванням відбиттів та інтерференцій, використання часових та просторових характеристик хвиль для швидкого визначення місця пошкодження.

Перспектива: РЗБХ може стати значним кроком вперед у енергосистемах майбутнього за рахунок швидшого та більш надійного захисту, якщо подолати технічні та економічні бар’єри

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сучасні системи електропостачання вимагають надійного та швидкого захисту від аварійних режимів. Комп'ютерний релейний захист (КРЗ) відіграє важливу роль у забезпеченні цієї надійності, пропонуючи низку переваг порівняно з електромеханічними аналогами. Однак, він також має певні недоліки, які необхідно враховувати при його застосуванні.

Переваги КРЗ включають: підвищену чутливість та швидкодію, гнучкість налаштувань та можливість адаптації до зміни умов мережі, інтеграцію з системами автоматизації та управління, а також розширені можливості діагностики та моніторингу. Завдяки використанню цифрової обробки сигналів, КРЗ може реалізовувати складні алгоритми захисту, що неможливо досягти з використанням традиційних реле.

Водночас, КРЗ має і певні недоліки: залежність від надійності та стабільності роботи комп'ютерного обладнання, вразливість до кібератак, необхідність кваліфікованого персоналу для налаштування та обслуговування, а також потенційна чутливість до електромагнітних завад.

Одним з перспективних напрямків розвитку КРЗ є використання реле дистанційного захисту на основі біжучої хвилі (РДЗ БХ). РДЗ БХ використовує швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі, що виникає при пошкодженні, для миттєвого виявлення та відключення аварійної ділянки. Це дозволяє значно підвищити швидкодію захисту, особливо на лініях електропередачі великої протяжності, де традиційні дистанційні захисти можуть мати значну затримку.

Узагальнюючи, КРЗ, незважаючи на певні недоліки, є перспективним напрямком розвитку систем захисту електроенергетичних об'єктів. Постійне вдосконалення алгоритмів та технічного забезпечення, а також розробка нових підходів, таких як РДЗ БХ, дозволяють значно підвищити надійність та ефективність роботи електроенергетичних систем.

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, 1984 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. Rudenberg, R. (1968) Electrical Shock Waves in Power Systems, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

16. Stevenson, Jr., William D. (1982) Elements of Power System Analysis, 4th edition, McGraw-Hill Inc.

17. Sunde, Erling D. (1949) Earth Conduction Effects in Transmission Systems, D. Van Nostrand Company; (1968) Dover Publications, New York.

18. Bewley, L.V. (1933) Traveling Waves on Transmission Systems, John Wiley & Sons, Inc. New York; (1963) Dover Publications, New York.