

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота  
на правах рукопису

Люльчак Дмитро Константинович

УДК 621.359.4

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Підвищення дійсності знаходження ушкоджень ізоляції з високим  
перехідним опором в високовольтних мережах з ізолюваною нейтраллю  
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

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

Люльчак Д.К.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

## АНОТАЦІЯ

Люльчак Д.К. Підвищення дійсності знаходження ушкоджень ізоляції з високим перехідним опором в високовольтних мережах з ізольованою нейтраллю . Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

У роботі розглянуті питання пов'язані з підвищенням дійсності знаходження ушкоджень ізоляції в високовольтних мережах з ізольованою нейтраллю .

Проведено всесторонній аналіз однофазних замикань на землю.

**Ключові слова:** високовольтна мережа, ізольована нейтраль, ізоляція, однофазне замикання.

## ABSTRACT

Lyulchak D.K. Increasing the validity of finding insulation damage with high transient resistance in high-voltage networks with an isolated neutral. Qualifying work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polish National University, Zhytomyr, 2023.

The issues considered in the work are related to increasing the validity of finding insulation damage in high-voltage networks with an isolated neutral.

A comprehensive analysis of single-phase earth faults has been carried out.

**Key words:** high-voltage network, isolated neutral, isolation, single-phase circuit.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ.	6
1.1 Однофазне замикання на землю	6
1.2 Види ОЗЗ та їх особливості	11
1.3 Централізовані захисти від ОЗЗ	16
Висновки по розділу 1	19
РОЗДІЛ 2 ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ІЗОЛЯЦІЇ З ВЕЛИКИМИ ПЕРЕХІДНИМИ ПРОТИ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖАХ З ІЗОЛОВАНОЇ НЕЙТРАЛІЮ	20
2.1 Принципи моніторингу стану ізоляції	20
2.2 Аналіз методу діагностики і прогнозування залишкового ресурсу кабельних ліній у результаті старіння ізоляції, викликаного частиними розрядами	28
2.2.1 Математична модель появи включень	29
2.2.2 Діагностичні характеристики ізоляційних матеріалів	33
Висновки по розділу 2	35
ВИСНОВКИ	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	37

## ВСТУП

Надійність роботи та безпека експлуатації розподільних мереж 6-10кВ із ізольованою нейтраллю багато в чому залежить від вирішення проблеми достовірної ідентифікації пошкоджень ізоляції у вигляді локальних несиметричних знижень опору ізоляції, обумовленої складною картиною виникнення та розтікання несиметричних струмів витоку. І тому необхідний безперервний автоматичний контроль, який би виявлення дефектів на ранній стадії розвитку [1, 2, 4].

Ця проблема зазвичай розглядається з точки зору забезпечення надійної роботи релейного захисту від замикань на землю, при цьому маються на увазі замикання на землю через мале опір, коли струм однофазного замикання на землю (ОЗЗ) визначається ємністю мережі.

Кваліфікаційна робота присвячена теоретичному обґрунтуванню принципів роботи централізованої системи селективного контролю стану ізоляції, що ґрунтується на порівняльному аналізі результатів вимірювань струмів нульової послідовності промислової частоти та зрушень фази між струмом та напругою нульової послідовності в кожному приєднанні, що і складає її **актуальність**. Як відомо, захисту, що ґрунтуються на відносному вимірі, забезпечують більш надійне визначення пошкодженого приєднання.

Технічні рішення, що розглядаються, доповнюють апаратуру релейного захисту та автоматики (РЗА), оскільки призначені для аналізу струмів витоку через великі перехідні опори в місці пошкодження ізоляції з метою визначення тенденцій зміни та прогнозування можливих ОЗЗ до стадії розвитку пошкодження ізоляції у вигляді дугових переривчастих ОЗЗ.

Надалі під ОЗЗ мається на увазі замикання однієї з фаз на землю саме через велике перехідне опір (3-10кОм і більше).

Відповідно **метою кваліфікаційної роботи** є питання пов'язані з підвищенням дійсності знаходження ушкоджень ізоляції в високовольтних мережах з ізольованою нейтраллю .

**Об'єктом дослідження** являється ізоляція високовольтних мереж з ізолюваною нейтраллю.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в виробленні рекомендацій по подовженню терміну служби ізоляції високовольтних мереж з ізолюваною нейтраллю.

**Перелік публікацій автора за темою дослідження:**

Люльчак Д.К. АНАЛІЗ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023», 01.05.2023, Житомир, Україна. С. 69-71

Гончаренко Ю.П., Соколовський О.Ф. Люльчак Д.К. ПРИНЦИПИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖАХ З ІЗОЛОВАНОЇ НЕЙТРАЛЛЮ

Матеріали науково-практичної конференції науково-педагогічних працівників, докторантів, аспірантів та молодих вчених факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ – 2023», 01.05.2023, Житомир, Україна. С. 69-71

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ОДНОФАЗНИХ ЗАМИКАНЬ НА ЗЕМЛЮ

#### 1.1 Однофазне замикання на землю

Замикання фази на землю створює ненормальний режим роботи електричних мереж і становить небезпеку з низки причин:

- можливість появи перенапруги, 2,4–3,5-кратного порівняно з фазним [1, 2, 3], що може призвести до пробоя ізоляції неушкоджених фаз та переходу ОЗЗ у «двомісне» або подвійне замикання на землю, близьке за своїми характеристиками до двофазних коротких замикань (КЗ). Ризик виникнення таких подвійних замикань помітно зріс останнім часом у зв'язку зі старінням ізоляції електричних машин та апаратів на багатьох енергооб'єктах та відсутністю коштів на їх модернізацію та заміну;
- виникає небезпека ураження електричним струмом обслуговуючого персоналу та споживачів;
- при тривалому наявності ОЗЗ у мережі відбувається прискорене старіння ізоляції та пошкодження електроустаткування;
- можливі явища ферорезонансу (особливо при почерговому відключенні споживачів), від яких найчастіше виходять з ладу трансформатори напруги.

За перерахованими причинами замикання на землю мережу необхідно відключати. У мережах, що працюють в умовах підвищеної небезпеки для обслуговуючого персоналу, захист від замикань на землю виконує функції захисного відключення та за умовами техніки безпеки повинен працювати без витримки часу на вимкнення. Для захисту електродвигунів від замикань на корпус необхідно застосовувати спеціальні захисти, що мають високу чутливість, оскільки струми замикання на корпус менше 5 А можуть становити для ізоляції небезпеку [4].

Будь-який розвиток техніки йде методом від простого до складного. Найбільш простими захистами від замикань на землю є захисти струму та напруги нульової послідовності (НП) промислової частоти. Для реалізації таких захистів достатньо пристрою, що реагує на значення струму або

напруги, що діє, відповідно. Однак простота таких пристроїв позначається на їх можливостях. Загальний неселективний захист напруги нульової послідовності тільки сигналізує про появу замикання на землю на будь-якому приєднанні секції. Серед недоліків струмових захистів НП можна відзначити наступні: фіксована уставка, відбудова струму спрацьовування від суми струму небалансу нульової послідовності та власного ємнісного струму лінії, відмова у спрацьовуванні при замиканнях при захисті як кабельних ліній (КЛ), так і повітряних (ПЛ) [5]. Для захисту струмових реле РТ 40/0,2 і РТЗ-50 можливі зайві спрацьовування при зовнішніх ОЗЗ через різке збільшення струмів нульової послідовності при дугових замиканнях за рахунок високочастотних складових [6, 7]. А для захисту на реле РТЗ-51 при живленні від мережі постійного струму 110 або 220 В можливі помилкові спрацьовування в моменти комутації мережі, що виникають з різних причин [8].

При реалізації струмових захистів НП на мікропроцесорних (МП) терміналах з'явилася можливість використовувати складні характеристики залежності струму спрацьовування від часу. Тому з'явилися захисту із зворотнозалежною часточковою характеристикою, для них [9] не потрібно відбудова від власного ємнісного струму приєднання. Однак такий принцип дії захисту має низку істотних недоліків. Основний недолік полягає в тому, що селективність спрацьовування забезпечується витримкою часу, у зв'язку з цим створення залежних систем із різними витримками часу стає практично неможливим. Робота таких захистів можлива тільки на відключення, інакше через деякий час усі захисту почнуть сигналізувати про наявність замикання на землю. При відмові вимикача пошкодженого приєднання відбудеться неселективне вимкнення приєднання з другим за величиною струмом.

Захисти, що використовують лише один сигнал струму НП, незважаючи на свою простоту, мають суттєві недоліки, які призводитимуть до їх неселективних дій. У ході подальшого вдосконалення таких захистів стали використовувати два сигнали - струм та напруга НП для визначення напрямку.

Велика кількість спрямованих захистів реагують на напрямок потужності нульової послідовності в режимі, що встановився. Чутливість таких захистів вище, ніж ненаправлених, оскільки їхній струм спрацьовування відбудовується [6, 7] тільки від струму небалансу в «максимальному робочому режимі», а відбудова захисту від власного ємнісного струму лінії не потрібна, оскільки від цього струму вона відбудована «у напрямку». Загальним недоліком захисту такого типу є їх неселективні дії або відмова у спрацьовуванні при дугових ОЗЗ, що перемежуються. Ця неселективність не пов'язана з програмною чи апаратною реалізацією. Спрямовані захисту – це такі захисту, які визначають різницю фаз між сигналами та залежно від отриманого кута приймають рішення. Проте різницю фаз можна визначити лише у гармонійних сигналів, т. б. сигналів однієї частоти. Якщо розглянути осцилограму замикання на землю кабельної мережі 10 кВ на рис. 1.1, можна зробити висновок, що поняття кута між кривими струму і напруги відсутня, так як сигнали не гармонічні.

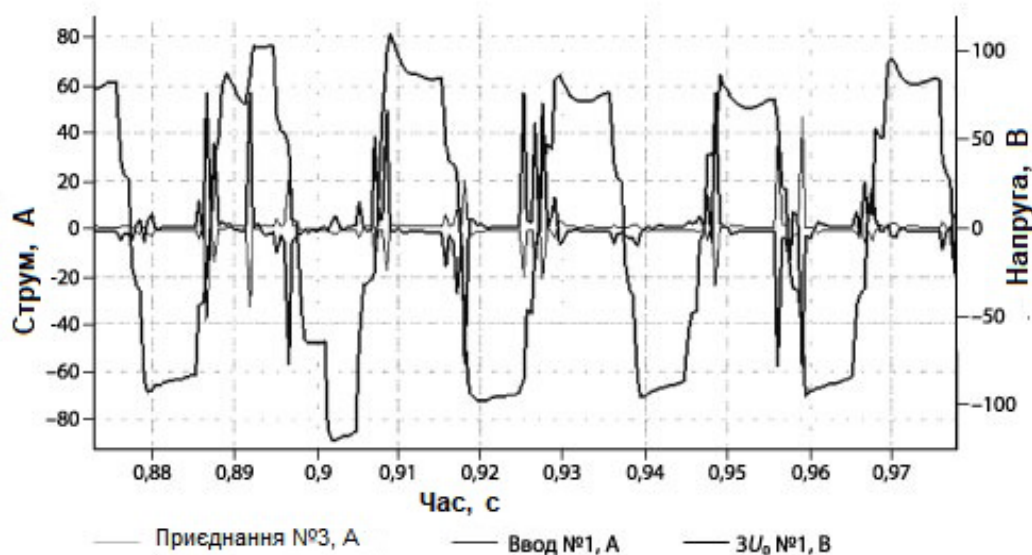


Рисунок 1.1 - Осцилограма дугового замикання на землю в кабельній мережі 10 кВ

Іншим методом визначення пошкодженого приєднання з використанням сигналів струму і напруги НП є розрахунок активної потужності нульової



послідовності в усталеному режимі [10, 11]. Захисти, реалізовані на цьому принципі, мають вищу стійкість функціонування в режимах з переміжною дугою у місці ОЗЗ і відбудовані переважно від кидків ємнісних струмів у перехідних процесах. Забезпечити стабільне функціонування таких захистів можна переважно у мережах з резистивним заземленням нейтралі.

Для усунення недоліків захистів, що використовують струми та напруги НП промислової частоти, були розроблені захисти від ОЗЗ, які реагують на вищі гармоніки електричних величин [1]. При виникненні дугових ОЗЗ вміст вищих гармонійних складових у мережі різко збільшується, причому вміст вищих гармонійних струму нульової послідовності пошкодженої лінії значно більше, ніж у струмах нульової послідовності непошкоджених ліній. Ці процеси спостерігаються у мережах усіх видів заземлення нейтралі. Загальні недоліки пристроїв, виконаних з використанням вищих гармонік:

- ймовірність відмови у спрацьовуванні при ОЗЗ через перехідні опори [12, 13];

- нестабільність складу та рівня вищих гармонік у струмі НП. Умови селективності неспрацьовування при зовнішніх ОЗЗ та стійкості спрацьовування при внутрішніх пошкодженнях для пристроїв абсолютного виміру вищих гармонік забезпечуються в основному на великих підстанціях і електростанціях з великим числом приєднань.

Інша категорія захисту – це захисти від ОЗЗ, які реагують на електричні величини перехідного процесу [1, 14]. Серед переваг таких захистів можна відзначити можливість фіксації всіх різновидів ОЗЗ, незалежність дії від режиму заземлення нейтралі, велику чутливість до замикань через перехідний опір, великі значення амплітуд перехідних струмів, що спрощують відбудову від струмів небалансу фільтра струмів нульової послідовності (ФСНП) і забезпечення чутливості захисту.

Але й такі захисту мають недоліки. Всім захистам притаманні єдині недоліки, такі як відсутність безперервної дії захисту, спотворення фазових

співвідношень між струмом і напругою, що виникає в момент ОЗЗ у відбитій від кінця лінії хвилі, що захищається [15], можливі помилкові спрацьовування від перешкод, що виникають одночасно в ланцюгах струму і напруги при відсутності ОЗЗ, наприклад, можлива помилкова робота таких захистів у мережах з компенсованою нейтраллю при відключенні трифазних КЗ. У захистах КЗЗП і ПЗЗМ застосовано принцип роздільної фіксації початкових знаків перехідного струму та напруги нульової послідовності з подальшим їх порівнянням, який менш ефективний через можливість зайвих спрацьовувань при малих значеннях підведених величин [1].

І остання група захистів від ОЗЗ, які слід розглянути, це захисти, що реагують на накладений струм [1]. Накладений струм може бути частотою як вище промислової, так і нижче. Для створення струму підвищеної частоти можливе використання нелінійного опору, включеного між нейтраллю мережі та землею. Однак цей пристрій значно підвищує вартість таких захистів і може знизити надійність функціонування захисту. Також можна відзначити той факт, що значна високочастотна складова може бути присутня в струмах приєднань і в нормальному режимі. Це насамперед відноситься до мереж, пов'язаних із виробництвами, що мають нелінійне навантаження. У таких випадках описаний спосіб захисту непридатний. Крім того, як показують проведені дослідження [16], гармоніки з частотою 100 Гц з'являються майже в 2 рази частіше, ніж, наприклад, частотою 25 Гц, і амплітуди їх набагато більші.

Тому ряд розробників створили захисти, що реагують на накладений струм частотою нижче за промислову. Різниця по частоті струму небалансу ФСНП (50 Гц і гармоніки, кратні трьом) і діючої впливової величини, (25 Гц) дозволяє спростити відбудову захисту від небалансу і уникнути загрублення захисту по первинному струму. Сам накладений струм частотою нижче за промислову отримати простіше, і потрібна менша потужність генеруючого джерела. В результаті такі захисти забезпечують можливість виміру великих значень активного опору фазової ізоляції, мають меншу залежність чутливості від

перехідного опору в місці замикання та кращий захист від перешкод струму промислової частоти [17].

До основних недоліків захисту, що реагують на накладений струм частотою нижче промислової, можна віднести необхідність підключення в нейтраль мережі спеціального пристрою для створення контрольного струму, вплив на стійкість функціонування захисту похибок ТСНП, що зростають при зменшенні робочої частоти, ускладнення схеми первинної комутації через необхідність підключення джерела накладеного струму та труднощі підключення джерела допоміжного струму при використанні в мережі кількох ДГР, встановлених на різних об'єктах. Не виключені також складності відбудови від природних гармонійних складових при зовнішніх дугових ОЗЗ, що перемежуються, при яких спектр струму залежить від параметрів мережі і режиму заземлення її нейтралі, положення точки ОЗЗ в мережі. Крім того, при замиканнях через великі перехідні опори відбувається зниження контрольного струму [18].

У цілому нині індивідуальні захисту мають загальні недоліки, пов'язані або з принципом дії, або безпосередньої реалізацією пристроїв захисту. При цьому поява мікропроцесорних пристроїв захисту не зрушила вирішення проблеми виявлення пошкодженого приєднання до позитивної області, оскільки самі алгоритми визначення замикання на землю залишилися незмінними.

Узагальнюючи, можна висунути такі основні вимоги до захисту: використання уставки, що залежить від параметрів замикання, виявлення замикань через великі перехідні опори та дугу, можливість створення системи ступінчастих захистів від замикань на землю. Саме неможливість зважати на ці вимоги призводить до низької ефективності пристроїв індивідуального типу.

## **1.2 Види ОЗЗ та їх особливості**

Щоб зрозуміти, у чому складність виявлення ОЗЗ, розглянемо процеси, які відбуваються у мережі. Можна виділити два основні види однофазного

замикання на землю: металеве та дугове . Металеве та дугове замикання може відбуватися через підвищений опір у місці контакту із землею, що призведе до зниження як струмів однофазних замикань, так і напруги нульової послідовності.

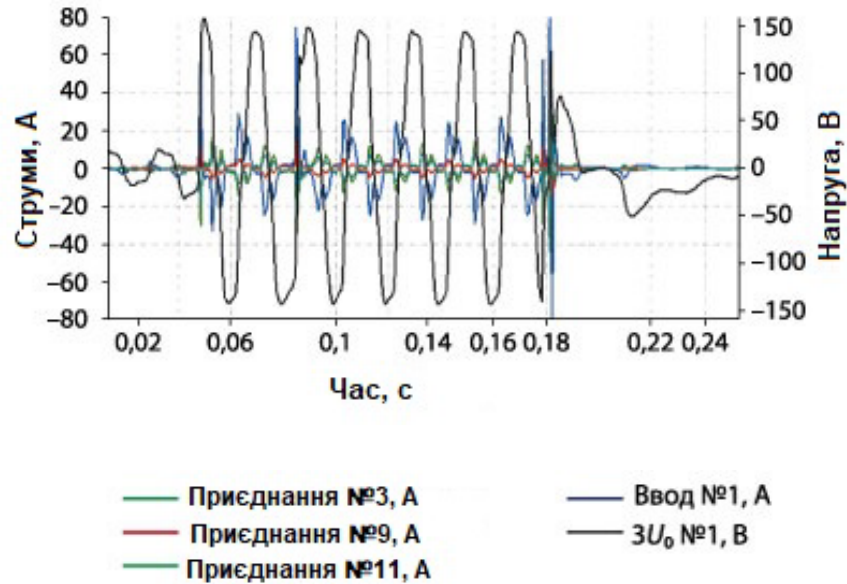


Рисунок 1.2 - Осцилограма ОЗЗ, що самоусунулось, в кабельній мережі 10 кВ

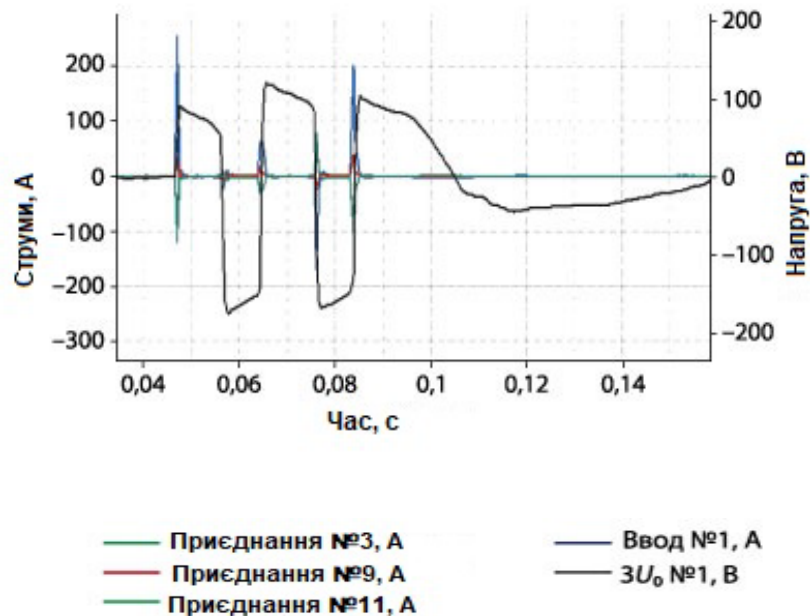


Рисунок 1.3 - Осцилограма дугового ОЗЗ, що самоусунувся, в кабельній мережі 10 кВ

Найбільш часто перехідний опір впливає на ПЛ, де відбувається контакт з деревами або падіння проводу на землю. Для наочності наведемо статистику щодо ОЗЗ у міській кабельній мережі 10 кВ (пошук ОЗЗ у мережі здійснювався шляхом почергового відключення, відповідно ОЗЗ існувало тривалий час):

- 3% замикань самоусунулися до дій персоналу;
- 38% замикань перейшли у подвійні замикання з роботою струмових захистів;
- 59% ОЗЗ було виявлено та ліквідовано персоналом.

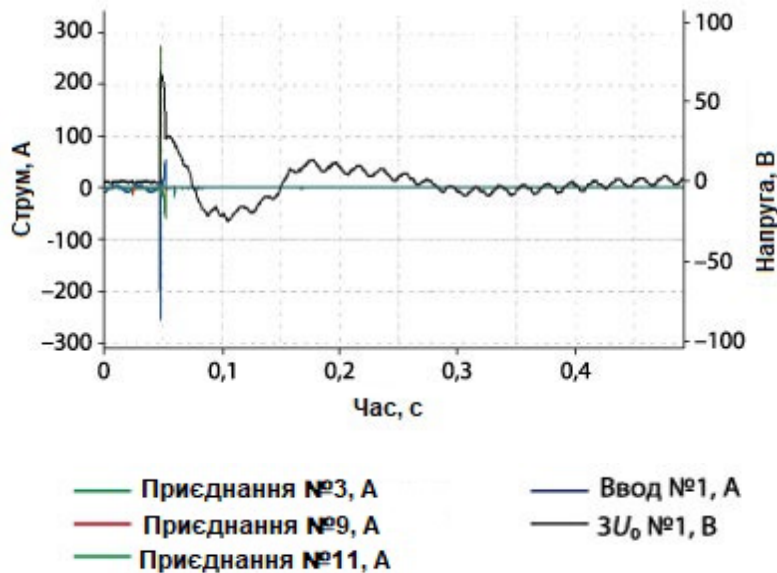


Рисунок 1.4 - Осцилограма струмів та напруг НП при включенні приєднання з різночасністю включення полюсів вимикача

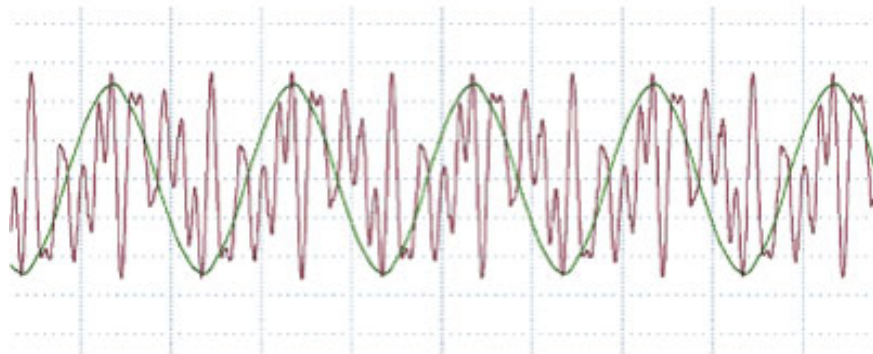


Рисунок 1.5 - Осцилограма струму та напруги нульової послідовності при металевому ОЗЗ у мережі з компенсацією ємнісного струму

При цьому всі ці замикання можна поділити за типами:

- 44% – металеві замикання;
- 26,5% - дугові замикання на землю;
- 29,5% - замикання, що самоусунулися.

У мережах з ПЛ відсоток дугових замикань становить до 80%.

Замикання, що самоусунулися - це, по суті, невирішена проблема. За результатами моніторингу, всі замикання, що самоусунулися, протягом 1–7 днів призводили до стійких замикань (рис. 1.2, 1.3). При цьому «клювань землі» спостерігалось кілька за добу, переважно в нічний час, коли фазна напруга дещо зростає через зниження навантаження. Тому важливо мати швидкодіючий захист від замикань на землю. Спільно з побудовою системи захисту від ОЗЗ, заснованої на ступінчастому принципі забезпечення селективності, пошкоджене приєднання буде відключатися з мінімальною витримкою часу. І «клювання землі» не порушуватимуть нормальну роботу мережі.

Крім ОЗЗ які самоусунулися, в мережі в моменти комутацій через різночасність включення полюсів вимикача виникають несиметрії, що призводять до підкидання напруги нульової послідовності та появи струмів НП. Для захисту, що діють без витримки часу або реагують на складові перехідного процесу в момент ОЗЗ, такий режим може призвести до неселективних дій (рис. 1.4).

Найбільш простим режимом є металеве ОЗЗ, коли струми являються чітким періодичним сигналом і немає безперервного перехідного процесу. На рис. 1.5 представлена осцилограма струму та напруги в пошкодженому приєднанні при компенсації основної гармоніки ємнісного струму практично в нуль. Як видно з осцилограми, застосування спрямованих захистів для мереж з компенсованою нейтраллю неможливо, тому що немає можливості визначити напрямок – частота струму та напруги відрізняються.

У мережах із ізольованою нейтраллю основна гармоніка перевищує решту в 5–10 разів. При металевому ОЗЗ (рис. 1.6) можна визначити напрямок на ділянці осцилограми, що встановилася. Тому при металевих ОЗЗ більшість захистів працюватиме коректно.

Зовсім інша картина складається у разі виникнення дугового замикання землю. У графіку переважають кидки струму в моменти перезаряджання ємностей через дугу. У цьому такі кидки струму досягають 4–8-кратної величини струму основної гармоніки (рис. 1.7, 1.8). Дуга горить нестабільно – змінюється частота перезапалювань (рис. 8), тобто замикання може почати перемежовуватися.

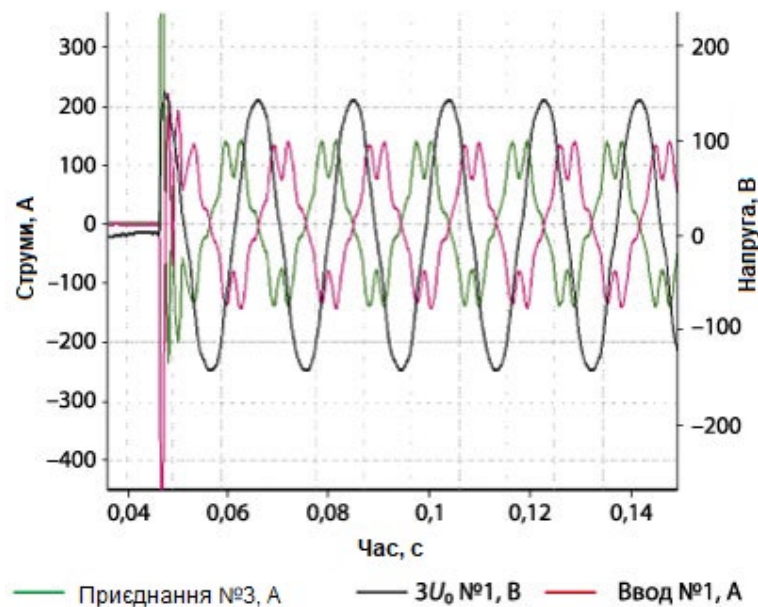


Рисунок 1.6 - Осцилограма металевого ОЗЗ у мережі без компенсації струмів замикання на землю

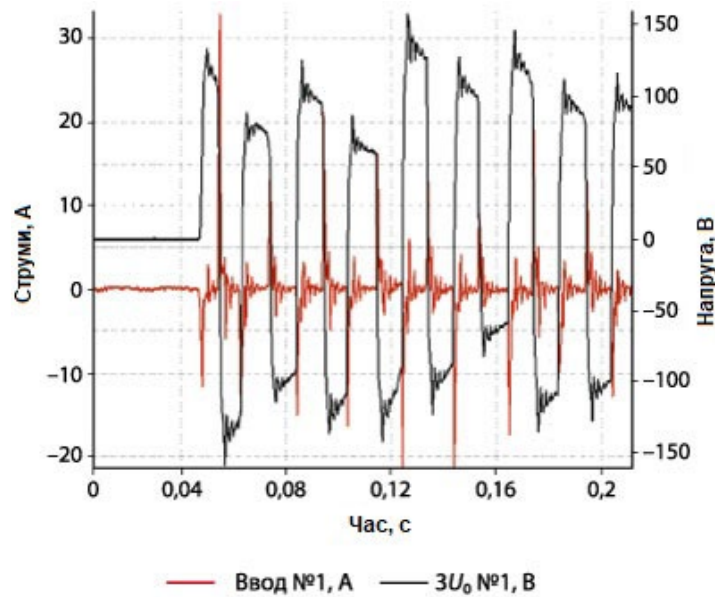


Рисунок 1.7 - Осцилограма дугового ОЗЗ у зовнішній мережі

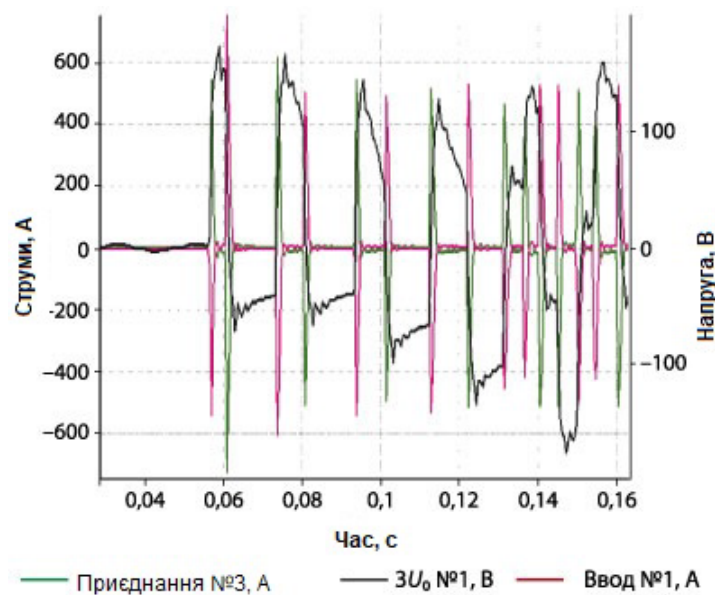


Рисунок 1.8- Осцилограма дугового ОЗЗ на приєднанні, що відходить, без компенсації струмів замикання на землю.

### 1.3 Централізовані захисти від ОЗЗ

Як було показано, більшість індивідуальних захистів мають різні недоліки. Це позначається на роботі мережі. Якщо захисту відмовляють у дії або відсутні, то замикання на землю можуть призвести до великих аварій, що



супроводжуються значними збитками, а також до старіння ізоляції всієї мережі, накопичувальний ефект від якого оцінити неможливо.

Сам принцип функціонування централізованих захистів забезпечує більш високу якість захисту [7, 19], використовуючи інформацію про струми НП не тільки свого приєднання або секції збірних шин, але й інформацію з інших об'єктів, наприклад, що надходить від трансформаторів струму, що вимірюють струм високовольтного заземлюючого резистора, а також ТНП іншої секції.

Централізований принцип побудови захисту передбачає порівняння струмів нульової послідовності приєднань. В основному застосовують порівняння амплітудних або діючих значень струмів нульової послідовності. Розрахунок цих значень може проводитися як у початковий момент часу, тобто ґрунтуючись на перехідних величинах замикання, так і в режимі, що встановився. Крім того, можливе застосування вищих гармонійних складових струмів нульової послідовності або струму, накладеного з частотою, відмінною від промислової. Для розширення області застосування для підстанцій з великим числом приєднань, можливе введення в такі захисту додаткової інформації, яка дозволяє зробити відбудову від дії деяких складних режимах. Наприклад, отримання інформації про напругу нульової послідовності з іншої секції підстанцій шин може підвищити чутливість [19]. Це потрібно в деяких випадках у мережах 35 кВ, що складаються переважно з дволанцюгових ПЛ. Централізовані захисту (ЦЗ) можуть застосовуватися у всіх мережах середньої напруги, це можуть бути як мережі ізольованою та компенсованою нейтраллю, так і з нейтраллю, заземленою через резистор.

Існує два методи визначення максимального значення сигналу – це методи послідовного та паралельного порівняння. Метод паралельного порівняння можна виконати з урахуванням спеціальних фізичних елементів. Послідовне порівняння йде значно повільніше, і до появи швидкодіючих мікропроцесорних захистів вважалось, що захисту, виконані виходячи з методу послідовного порівняння, мають недостатню швидкодію. Саме поява мікропроцесорних пристроїв релейного захисту забезпечила поштовх

реалізації централізованих захистів від замикань на грішну землю. Мікропроцесорні пристрої дозволяють обробляти до 48 каналів одночасно з різницею вимірювання струмів по каналах не більше 100 мкс. При швидкодіях менше 100 мкс застосування централізованого принципу втрачає всю доцільність, оскільки захист перетворюється на індивідуальні пристрої всередині одного блоку захисту. За принципом послідовного порівняння раніше випускалися захисту, де черговий персонал методом почергового вимірювання напруги на клеммах реле вимірював струми, що протікають, і робив висновок про пошкоджене приєднання самостійно.

Однією з особливостей централізованого захисту від замикань на землю є можливість виявлення ОЗЗ на шинах, що означає, по суті, ОЗЗ у будь-якому приєднанні, яке не має ТСНП, на ТН, в обмотках ТСН та силових трансформаторів. Для виявлення таких ушкоджень централізований захист має працювати як диференційний захист шин від ОЗЗ. Цей підхід став класичним і використовується у більшості сучасних МП-пристроїв захисту від замикань на землю [20].

На відміну від індивідуальних захистів, що мають проблеми з рівнем ємнісного струму, що постійно змінюється, ЦЗ забезпечують селективність дії в переважній більшості випадків, так як ємнісні струми додаються в пошкодженому приєднанні незалежно від їх абсолютних рівнів, конкретних параметрів і стану мережі, а також від виду заземлення нейтралі .

Ознаки, на яких ґрунтуються централізовані захисту:

- порівняння активної потужності нульової послідовності;
- виявлення накладеного струму;
- порівняння діючих значень сигналів струмів нульової послідовності;
- порівняння сум чинних значень струмів вищих гармонік;
- порівняння напрямків струмів.

Недоліки є у зазначених принципів дії.

Порівняння активної потужності нульової послідовності стабільно працює тільки в мережах з великою складовою активного витоку та в мережах з

резистивним заземленням нейтралі. Тому такий принцип не можна назвати універсальним. Принцип накладання струму з використанням централізованих захистів – один із найнадійніших варіантів реалізації захистів, особливо при використанні накладеного струму спеціальної форми. Однак складності реалізації саме пристроїв генерації накладеного струму, особливо в розгалужених мережах, за можливості перемикання живлення на різні джерела обмежує застосування цієї ознаки. Три ознаки, що залишилися - найбільш поширені і ефективні.

Крім того, можна виділити і недоліки самої реалізації централізованих захистів, пов'язаних з апаратною архітектурою та принципом дії:

- складність монтажу на підстанції, оскільки потрібно зібрати - інформацію з усіх осередків в одному місці;
- відмова одного пристрою призводить до відмови захисту від ОЗЗ на всій підстанції;
- необхідно не менше трьох приєднань, якими протікає струм ОЗЗ, для роботи захисту;
- неможливо відрізнити пропорційні струми великої величини через похибку ТТНП до 10%.

### **Висновки по першому розділу**

Захисти від замикань на землю, що діють на сигнал і на відключення, повинні мати селективність, тобто здатність визначати пошкоджену лінію (або напрямок). Виконати такий захист нелегко, оскільки струми однофазного замикання на землю в повітряних мережах 10 кВ дуже малі навіть у порівнянні зі струмами навантаження. Крім того, однофазні замикання на повітряних лініях 10 кВ найчастіше відбуваються через перехідні опори, які знижують значення струмів нульової послідовності в порівнянні з металевим замиканням, причому не тільки струмів основної частоти, але і струмів вищих гармонік.

## РОЗДІЛ 2

### ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ІЗОЛЯЦІЇ З ВЕЛИКИМИ ПЕРЕХІДНИМИ ПРОТИ У ВИСОКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖАХ З ІЗОЛОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

#### 2.1 Принципи моніторингу стану ізоляції

Концепція моніторингу стану ізоляції заснована на припущенні про виникнення майбутнього ушкодження твердої високовольтної ізоляції в наслідок розвитку прихованого дефекту, що виник при виготовленні, монтажі, ремонті чи експлуатації. З огляду на цю передумову моніторинг стану ізоляції по несиметричним струмам витоку дозволяє виявити дефекти які розвиваються і зробити необхідні заходи до виникнення аварій.

Для аналізу роботи централізованої системи контролю стану ізоляції було застосовано спрощену схему заміщення розподільчої мережі. У схемі не враховувалися струми витоку через ємності живильного трансформатора, шин розподільного пристрою (РУ), а також струми через заземлені обмотки вимірювальних трансформаторів напруги (ТН) і через обмежувачі перенапруг (ОПН). Вказані струми знаходяться поза зони контролю системи, так як датчики-перетворювачі встановлені на відхідних від РУ кабелях. Вплив цих неконтрольованих струмів витоку на результати вимірювань може бути суттєвим і є предметом окремого аналізу, але у розглянутій моделі розподільчої мережі вони прийняті зневажливо малими по порівнянню з ємностями приєднань до РУ. Опір ізоляції приєднань прийняті набагато більшими, чим ємнісні опору фаз щодо землі на промисловій частоті, і тому не враховувалися.

Так як значення перехідного опору в місці ушкодження ізоляції не впливає на співвідношення сигналів від датчиків на контрольованих приєднаннях, то розрахунки можна виконувати при достатньо великому, але постійному опорі в місці ОЗЗ. Фазні ємності прийняті симетричними.

Так як значення перехідного опору в місці ушкодження ізоляції не впливає на співвідношення сигналів від датчиків на контрольованих приєднаннях, то

розрахунки проводились для достатньо великого, але постійного опору в місці ОЗЗ. Фазні ємності прийняті симетричними.

При практичному застосуванні системи контролю основним фактором, визначальним верхню межу значення перехідного опору в місці ушкодження ізоляції, є чутливість датчиків-перетворювачів. Застосування в системі контролю стандартних трансформаторів струму нульовий послідовності (ТСНП) як датчиків-перетворювачів було виключено в зв'язку з їх недостатньою чутливістю і рядом проблем, описаних в роботах [1, 2].

Для усунення неоднозначності в термінології в роботі використовується термін «сигнал від первинного датчика-перетворювача», прямо пропорційний вимірюваному струму несиметричною витоку на землю в контрольованому приєднанні і збігається з ним по фазі. Прийняті припущення не здійснюють суттєвого впливу на важливі результати розрахунків процесів протікання струмів витоку на землю через великі перехідні опору.

Основним завданням було визначення можливостей амплітудної селекції для виявлення пошкоджень ізоляції при порівняльному аналізі сигналів від датчиків-перетворювачів.

На практиці діапазон значень ємностей приєднань може бути достатньо широким, а кількість можливих комбінацій по розподілу ємності щодо землі мережі між приєднаннями до розподільчого пристрою (РУ) може бути досить великим.

Під приєднанням мається на увазі кабельна або повітряна лінія, яка живить споживача електроенергії (трансформатор, електродвигун, перетворювачі частоти і т.д.). Між лініями та цими об'єктами споживання комутаційні апарати зазвичай не встановлюються. Тому управління, контроль і захист споживача електроенергії виконується як одного об'єкта - приєднання. У цьому випадку система контролю стану ізоляції з датчиками-перетворювачами встановлюється лише у РУ.

Вплив ступеня нерівномірності розподілу ємності мережі між контрольованими приєднаннями на достовірне виявлення приєднання з ОЗЗ

дуже суттєво. У зв'язку з цим найбільший інтерес представляє випадок, коли ємності приєднань різні, а ОЗЗ відбувається на будь-якому приєднанні.

Алгоритм роботи, в першому наближенні, полягає в виділенні з сукупності сигналів найбільшого по рівнем амплітуди і ранжируванні контрольованих приєднань за зазначеною ознакою. Однак можлива ситуація, коли після ранжирування сигналів по амплітуді різниця між декількома найбільшими буде недостатня для достовірного визначення приєднання з ОЗЗ.

Найпростіша перевірка достовірності полягає в порівнянні суми сигналів в «здорових» приєднаннях з сигналом від приєднання з передбачуваним ОЗЗ. У ідеалі має виконуватися рівність

$$I_{\text{озз}} = \sum_{i=1}^{n-1} I_i ,$$

де  $n$  - кількість контрольованих приєднань;  $I_i$  - сигнал від  $i$ -го приєднання. Цей прийом необхідний у випадку, коли треба переконатися у малому значення фазних ємностей поза зоною контролю. На практиці через невідому ємності поза зоною контролю (ємності на землю живильного трансформатора або генератора, шин РУ та т.п.), а також витоків через заземлені вимірювальні трансформатори напруги виходить нерівність

$$I_{\text{озз}} \leq \sum_{i=1}^{n-1} I_i ,$$

що може привести до хибного виявлення ОЗЗ при проведенні зазначеної перевіркової процедури.

Необхідність зниження ймовірності хибних виявлень вимагає застосування алгоритму, забезпечує підвищення достовірності виявлення. Тому у програмному забезпеченні системи централізованого контролю стану ізоляції передбачено використання заздалегідь введеної інформації про значення ємностей приєднань щодо землі.

Доцільно використовувати не абсолютні значення фазних ємностей приєднань, а відносні, то є наведені до середньої ємності приєднань, яка визначається виразом

$$C_{\text{cp}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i, \quad (2.1)$$

де  $C_i$  – ємність фази довільного приєднання з номером  $i$ ,  $n$  – кількість приєднань (передбачається, що всі приєднання входять до зону контролю, то це враховуються в математичній моделі).

У якості основного параметра, який характеризує ємність фази приєднання, використовується безрозмірний коефіцієнт відносної ємності  $K_C$ . Необхідно виділити три різновиди зазначеного коефіцієнта:

- коефіцієнт відносної ємності довільного приєднання  $i$  з фазною ємністю  $C_i$ :

$$K_C(i) = C_i / C_{\text{cp}}; \quad (2.2)$$

- коефіцієнт відсноною ємності приєднання з ОЗЗ  $z$  з фазною ємністю  $C_z$ :

$$K_C(z) = C_z / C_{\text{cp}}; \quad (2.3)$$

- коефіцієнт відносної ємності всією мережі. Виходячи з виразу (2.1) і визначення даного терміну, отримаємо

$$K_C(n) = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{C_{\text{cp}}} = n. \quad (2.4)$$

Надалі, для однаковості отриманих формул, використовується позначення коефіцієнта, а не кількість приєднань  $n$ .

Позначимо провідність середньої ємності приєднання через  $Y_C$ :

$$Y_C = j\omega C_{\text{cp}}.$$

З урахуванням сказаного, фазні провідності можуть бути записані в наступному вигляді:

$$Y_A = G + Y_C \cdot K_C(n); \quad Y_B = Y_C \cdot K_C(n); \quad Y_C = Y_C \cdot K_C(n).$$

Напруга зміщення нейтралі  $U_0$  в мережі з ізольованою нейтраллю описується загальновідомим виразом [3]

$$U_0 = \frac{U_A Y_A + U_B Y_B + U_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

де  $U_A, U_B, U_C$  - фазні напруги джерела, включеного в "зірку";  $Y_A, Y_B, Y_C$  - сумарні провідності відповідних фаз.  $G$  - перехідна провідність в місці ушкодження ізоляції;  $U_0$  - напруга зміщення нейтралі джерела електроенергії, тотожне напруги нульовий послідовності.

Після виконання підстановок і перетворень для  $U_0$  отримаємо наступний вираз:

$$U_0 = \frac{U_A}{1 + 3 \cdot Y_C \cdot \frac{K_C(n)}{G}} . \quad (2.5)$$

Струм нульової послідовності довільного приєднання і без ОЗЗ з коефіцієнтом відносною ємності  $K_C(i)$  описується виразом

$$I_i = -3U_0 \cdot Y_C \cdot K_C(i) . \quad (2.6)$$

Знак "мінус" позначає протифазність сигналу від датчика на приєднання з ОЗЗ сигналів від решти приєднань без ОЗЗ. Після перетворень з використанням формули (2.5) і (2.6) отримаємо

$$I_i = \frac{3 \cdot U_A \cdot Y_C \cdot K_C(i)}{1 + 3 \cdot Y_C \cdot \frac{K_C(n)}{G}} . \quad (2.7)$$

Струм, що реєструється на приєднання з ОЗЗ, описується виразом

$$I_z = \frac{3 \cdot U_A \cdot Y_C \cdot (K_C(i) - K_C(n))}{1 + 3 \cdot Y_C \cdot \frac{K_C(n)}{G}} . \quad (2.8)$$

Так як виявлення приєднання з ОЗЗ засновано на порівняльному аналізі вимірювань, тобто на порівнянні значень, отриманих за формулами (2.7) та (2.8), визначимо ставлення сигналу від датчика на приєднання  $z$  з ОЗЗ з коефіцієнтом відносною ємності  $K_C(z)$  до сигналу від датчика на довільне приєднання і з коефіцієнтом відносної ємності  $K_C(i)$ . Дане відношення позначимо як коефіцієнт корисного сигналу  $K_I$ . Пропускаючи проміжні перетворення, отримаємо наступне вираз:



$$I_I = \frac{I_z}{I_I} = \frac{K_C(n) - K_C(z)}{K_C(i)} . \quad (2.9)$$

Коефіцієнт корисного сигналу  $K_I$  показує, у скільки разів сигнал від приєднання  $z$  з ОЗЗ більше сигналу від деякого довільного приєднання  $i$ .

Проведемо нормування струмів від датчиків на приєднаннях без ОЗЗ, поділивши їх на відповідні коефіцієнти відносної ємності, тобто визначимо ставлення амплітуди струму, реєстрованого  $i$ -м датчиком, до коефіцієнтом відносною ємності цього приєднання:

$$I_{i(\text{норм})} = \frac{I_i}{K_C(i)} = -3U_0 \cdot Y_C . \quad (2.10)$$

Після такого нормування сигнали, що реєструються усіма датчиками-перетворювачами на приєднаннях без ОЗЗ, стають однаковими, що є принципово важливим для достовірного виявлення приєднання з ОЗЗ.

З вирази (2.9) слідує, що

$$I_z K_C(i) = I_i (K_C(n) - K_C(z)) . \quad (2.11)$$

Введемо поняття нормованого струму в приєднання з ОЗЗ:

$$I_{z(\text{норм})} = I_z \cdot K_C(z) . \quad (2.12)$$

Далі поділимо ліву і праву частини рівняння (2.11) на добуток відносних коефіцієнтів ємності  $K_C(i)$  і  $K_C(z)$  і підставимо в нього вираз (2.12). В результаті отримаємо рівняння, що зв'язує нормований струм від датчика на приєднанні з ОЗЗ з нормованим струмом від датчика довільному приєднання без ОЗЗ:

$$I_{z(\text{норм})} = \left( \frac{K_C(n)}{K_C(z)} - 1 \right) I_{i(\text{норм})} . \quad (2.13)$$

Необхідно відзначити важливість отриманого результату, обумовлену тим, що  $I_{i(\text{норм})}$  - величина стала. Для технічної реалізації отриманих закономірностей вводиться коефіцієнт нормованого корисного сигналу

$K_{I(\text{норм})}$  :

$$K_{I(\text{норм})} = I_{z(\text{норм})} I_{i(\text{норм})} , \quad (2.14)$$

де знаменник, згідно формули (2.10), величина постійна. Коефіцієнт нормованого корисного сигналу  $K_{I(\text{норм})}$  необхідний для оцінки відмінностей у нормованих сигналах при їхньому порівняльному аналізі з метою виявлення приєднання з ОЗЗ. Теоретично і експериментально встановлено, що

$$K_{I(\text{норм})} = \frac{K_C(n)}{K_C(z)} - 1. \quad (2.15)$$

Найбільше значення  $K_{I(\text{норм})}$  буде відповідати приєднанню з ОЗЗ, що дає чітку критеріальну ознаку для достовірного виявлення приєднання з ОЗЗ. Застосування формули (2.15) дозволяє використовувати довільну просту порогову обробку масиву значень коефіцієнта нормованого корисного сигналу  $K_{I(\text{норм})}$ , обчисленого по амплітудам сигналів від датчиків на всіх контрольованих приєднаннях, і забезпечити високу достовірність виявлення приєднання з ОЗЗ через великий перехідний опір.

Для достовірного виявлення ОЗЗ повинно виконуватися нерівність:

$K_{I(\text{норм})} > 1$ . У протилежному випадку можлива неоднозначність визначення приєднання з ОЗЗ, особливо для випадку, коли кількість контрольованих приєднань  $n$  мало (але у будь-якому разі має виконуватися нерівність  $n > 3$ ), а ємність приєднання  $z$  з ОЗЗ велика порівняно із середньою ємністю  $C_{\text{ср}}$  і при цьому ненабагато менше сумарної ємності мережі, тобто  $K_C(n)$  ненабагато більше  $K_C(z)$ . Тобто умовою достовірного виявлення приєднання із ОЗЗ є виконання нерівності  $K_C(n) > K_C(z)$  більше чим в два рази.

$$\frac{I_z}{I_G} = 1 - \frac{K_C(z)}{K_C(n)}. \quad (2.16)$$

де  $I_z$  - виміряне значення сигналу від датчика на приєднання  $z$  з передбачуваним ОЗЗ;  $I_G$  - струм через перехідний опір  $R=1/G$  у місці замикання.

Наведена вище формула (2.16) отримана в результаті математичного моделювання ОЗЗ через перехідний опір в мережі з довільною кількістю приєднань і підтверджено результатами обробки експериментальних даних.

Так як заздалегідь невідомо, на якому приєднанні відбулося ОЗЗ, вказана процедура проводиться після попереднього етапу процедури виявлення ОЗЗ для кількох найбільш «підозрілих» приєднань по черзі.

Далі визначимо відношення струму нульовий послідовності в приєднанні  $i$  без ОЗЗ з коефіцієнтом відносної ємності  $K_C(i)$  до струму, протікає безпосередньо через перехідну провідність  $G$  у місці ОЗЗ. Ставлення  $I_i/I_G$  треба брати зі знаком "мінус", так як ці струми протифазні. Після найпростіших перетворень і скорочень отримаємо

$$\frac{I_i}{I_G} = \frac{K_C(i)}{K_C(n)}. \quad (2.17)$$

В результаті послідовних обчислень за формулою (2.17) для масиву даних за струмами нульовий послідовності приєднань (зазвичай трохи більше 3-7) з'являється можливість порівняльного аналізу одержуваних результатів. Відношення за формулою (2.18) для приєднання з ОЗЗ до аналогічного відношення для будь-якого іншого буде описуватися виразом

$$\frac{I_z/I_G}{I_i/I_G} = \frac{K_C(n) - K_C(z)}{K_C(i)}. \quad (2.18)$$

Умовою застосовності формул (2.16, 2.17, 2.18) при  $K_C(z) \gg K_C(i)$  є виконання нерівності

$$\frac{K_C(n) - K_C(z)}{K_C(i)} \geq 1. \quad (2.19)$$

Практичне застосування формул (2.16, 2.17, 2.18) в алгоритмі обробки сигналів від датчиків-перетворювачів на контрольованих кабельних приєднаннях полягає в послідовній попарній підстановці значень струмів з масиву даних з метою визначення пар, що задовольняють зазначеним формул.

Застосування даної закономірності до «критичних» приєднань (велика ємність та великий сигнал від датчика на приєднанні) дозволяє суттєво підвищити достовірність виявлення приєднання з ОЗЗ через великий перехідний опір.

У умовах недостатності амплітудного аналізу питання достовірного виявлення приєднання з ОЗЗ вирішується за рахунок порівняльного аналізу фазових співвідношень. Як відомо, струм нульовий послідовності в приєднанні з ОЗЗ зрушений на  $90^\circ$  в одну бік від напруги нульової послідовності, а струми нульовий послідовності в решті приєднань зрушені на  $90^\circ$  в інший бік.

Таким чином, доповнення амплітудного порівняльного аналізу фазовим дозволяє достовірно виявляти приєднання з ОЗЗ навіть при великому перехідному опорі. Тут необхідно відзначити, що аналіз фазових співвідношень при несиметричній ємності фаз щодо землі, тобто при наявності деякої напруги усунення нейтралі, має свою специфіку та вимагає окремого розгляду.

## **2.2 Аналіз методу діагностики і прогнозування залишкового ресурсу кабельних ліній у результаті старіння ізоляції, викликаного частиними розрядами**

Дослідженню характеристик, що визначають надійну та безвідмовну роботу КЛ методами технічної діагностики, присвячено багато робіт [1 – 4]. Ці методи дозволяють локалізувати проблемні місця в ізоляційних матеріалах (ІМ), визначити рівень їх небезпеки, оцінити залишковий ресурс КЛ. Дослідженнями в галузі діагностики ізоляції, зокрема вивченням часткових розрядів (ЧР), займалися вітчизняні та зарубіжні вчені [2 – 5]. Зовнішніми проявами процесів розвитку ЧР є нагрівання ізоляції [6]. Актуальним є питання аналізу динаміки зміни характеристик ЧР у часі, що дозволяє оцінити стан ізоляції та її залишковий ресурс [5]. Розглянута в [7] математична модель нестационарних процесів теплообміну кабельних ліній базується на обліку теплових втрат в елементах конструкції кабельних ліній, де наведена двовимірною стаціонарною математичною моделлю, що описує процеси теплоперенесення в закритому та відкритому кабельних лотках. Для

складової конструкції КЛ, представленої у вигляді прямокутного перерізу, моделювання теплових процесів КЛ виконувалося з урахуванням енергії випромінювання та конвективного теплообміну. Вирішення поставленої задачі здійснювалося із застосуванням методу кінцевих елементів.

До недоліків існуючих температурних методів реєстрації ЧР можна віднести той факт, що вони розглядають старіння діелектрика під дією внутрішньої термомеханічної напруги та зовнішніх механічних впливів [8]. Теплове старіння ІМ вивчається вже давно, розроблено безліч методів, що дозволяють діагностувати процеси ІМ КЛ. У роботі [9] проводиться моделювання нестационарних теплових процесів в одножильному силовому кабелі з ізоляцією зшитого поліетилену. Наведена математична модель представлена у вигляді системи квазілінійних диференціальних рівнянь параболічного типу, вирішення якої здійснювалося за допомогою кінцевого різницевого методу, крайові та початкові умови не враховувалися.

Оптимальним з погляду оцінки надійності електричних мереж та систем електропостачання, отримання достовірної та повної інформації про стан ізоляції кабелів є поєднання методів інтегральної та локальної діагностики, заснованих на термодинамічному підході дослідження розвитку теплового пробую. Тому в роботі розглядається проблема оцінки та прогнозування залишкового ресурсу КЛ електричної мережі (ЕМ) в умовах впливу теплових режимів експлуатації. Для досягнення мети поставлено наступні завдання:

- встановити вплив температурного режиму роботи лінії, зовнішніх експлуатаційних факторів та режимів роботи на ізоляційні властивості КЛ електричних мереж;
- на основі математичної моделі старіння та виявлених змін властивостей ізоляції від експлуатаційних факторів запропонувати методику оцінки ресурсу КЛ.

### **2.2.1 Математична модель появи включень**

В ІМ кабельних ліній електричних мереж є різноманітні неоднорідності у вигляді включень, прошарків між окремими шарами, мікротріщин,

відшарування ізоляції та ін. За рахунок переросподілу електричного поля внаслідок відмінностей діелектричної проникності  $\varepsilon$  та питомої провідності  $\gamma$ , тобто  $\varepsilon_1 \cdot E_1 = \varepsilon_2 \cdot E_2$  або  $\gamma_1 \cdot E_1 = \gamma_2 \cdot E_2$  у місцях цих неоднорідностей виникає висока локальна напруженість поля. Розвиток розряду в області включення, де має місце висока локальна напруженість поля, викликає неповний пробій ізоляції – ЧР.

Успішне вирішення цієї проблеми неможливе без уявлення про фізичні процеси та фактори, що викликають виникнення та розвиток ЧР в ІМ, тому метою є розробка фізичних принципів визначення включень до ІМ методом ЧР.

Тепловий пробій пов'язаний з розігрівом діелектрика при протіканні струму провідності та розвитку діелектричних втрат. Розвиток теплового пробою загалом може бути представлений у вигляді послідовності, показаної на рис. 2.1, де  $U_B$  - напруга, що виникає на включенні;  $I_B$  – струм, що протікає на включенні;  $\theta_B$  – температура при включенні;  $tg\delta$  – тангенс діелектричних втрат;  $P_B$  - потужність, що виділяється при утворенні включення;  $W_B$  – енергія, що виділяється при виникненні включення;  $Q_B$  – теплота, що виділяється у включенні.

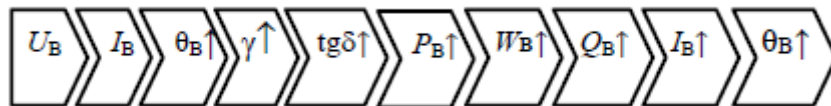


Рисунок 2.1 – Розвиток теплового пробою

Для виявлення закономірностей розвитку ЧР у газових включеннях, визначимо характеристики ЧР [10, 11], що беруть участь у руйнуванні ІМ (рис. 2.2), де  $C_B$  - ємність газового включення;  $C_{П,1} - C_{П,n}$  - ємність ізоляції, включеної послідовно з газовим включенням;  $r_B$  - опір каналу в газовому включенні;  $C_{ІЗ}$  - ємність решти ізоляції;  $R_a$  - опір абсорбції;  $R_{ПР}$  - опір провідності;  $h$  - товщина ізоляційного матеріалу;  $h_{П}$  - товщина ізоляції, розташованої послідовно з включенням;  $h_B$  – товщина ізоляції включення (розмір включення);  $\lambda$  – теплопровідність;  $Q_1$  та  $Q_2$  – виділена та відведена кількість теплоти має місце при температурах  $\theta_1$  та  $\theta_2$ ).

Для дослідження величини області включення, процесу розвитку ЧР, а отже, механізмів старіння та електричного пробою ІМ необхідно визначити параметри ЧР, а саме встановити зв'язок між напругою виникнення  $U_{\text{ЧР}}$  його максимальною величиною  $q_{\text{ЧР}}$  і товщиною включення  $h_{\text{В}}$ .

Напруженість електричного поля в газовому включенні перевищує напруженість поля ізоляційного матеріалу, оскільки його діелектрична проникність значно вища діелектричної проникності газу ( $\epsilon_{\text{повітря}} = 1$ ).

Якщо до ізоляційного матеріалу прикладена напруга  $U = U_m \sin \omega t$ , то на газовому включенні напруга буде дорівнювати:

$$U_{\text{В}} = U \frac{C_{\text{П}}}{C_{\text{В}}}.$$

Напруга, що прикладається, викликає накопичення поверхневого заряду на межі газового включення та решти діелектрика (рис. 2.2, а). Коли напруга на включенні досягне напруги початкової іонізації газу, стане ЧР ємності включення:

$$U_{\text{ЧР}} = \frac{U_{\text{В.ПР}}}{\sqrt{2}} \frac{C_{\text{В}} + C_{\text{П}}}{C_{\text{В}}},$$

$$C_{\text{П}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{П}} S_{\text{В}}}{h - h_{\text{В}}}, \quad C_{\text{В}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{П}} S_{\text{В}}}{h_{\text{В}}};$$

$U_{\text{В.ПР}}$  – пробивна напруга газового включення;  $S_{\text{В}}$  – площа газового включення.

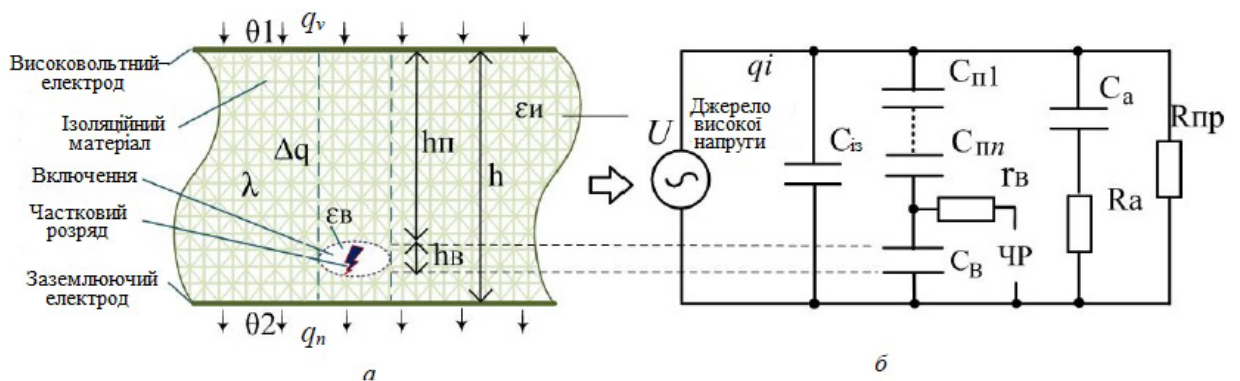


Рисунок 2.2 - Схема розвитку ЧР в ізоляції: *a* – досліджуваний ІМ; *б* – еквівалентна електрична схема заміщення у момент виникнення ЧР у включенні

Після підстановки  $C_{В,СП}$  (2.20) з урахуванням, що  $h_B \ll h$  і неоднорідності електричного поля ізоляції, отримаємо

$$U_{ЧР} = \frac{U_{В,ПР} \varepsilon_{П}}{\sqrt{2} \varepsilon_{В} \delta K_H} \frac{h}{\delta},$$

де  $K_H = E_{\max}/E_{СР}$  – коефіцієнт неоднорідності електричного поля в ізоляції, що дорівнює відношенню максимальної напруженості  $E_{\max}$  до середньої напруженості  $E_{СР}$  в ізоляційному проміжку.

Як показано на рис. 2.2, ізоляційний матеріал має товщину включення  $h_B$ , діелектричну товщину  $h$  та діелектричну проникність ізоляційного матеріалу  $\varepsilon_I = \varepsilon_{П}$ , де  $h_B \ll h$  при робочій напрузі  $U$ , напруга на включенні

$$U_B = \varepsilon_{П} \frac{h_B}{h} U.$$

Якщо включення має розмір  $h_{B1}$  ( $h_{B1} < h_{B2}$ ), при досягненні напруги мережі живлення величини розрядної напруги  $U_{В,ПР}$  відбудеться перший розряд, після розряду повторно почне накопичуватися поверхневий заряд і з часом  $t_1$  напруга на включенні досягне напруги початкової іонізації, внаслідок чого відбудеться наступний розряд і т.д. У разі включення з розміром  $h_{B2}$  часу для накопичення поверхневого заряду потрібно більше ( $t_1 < t_2$ ), отже, часовий інтервал між розрядами буде більшим.

З погляду безпеки нас цікавитиме лише висота включення, оскільки збільшення розміру  $h_B$  призведе до зростання потужності ЧР та подальшого пробою діелектрика. При напрузі  $U < U_{ЧР}$  в ізоляції не відбувається ЧР та електричного старіння, за відсутності інших видів старіння ізоляція може працювати необмежено довго.

Отже, чим більша напруга  $U_{ЧР}$ , тим вище допустима для ізоляції тривала робоча напруга. Зростання напруги, що прикладається, веде до лінійного



зростання рівня ЧР, а також до зниження порога їх виникнення. При певному напрузі  $U_{\text{кр}}$  – напруга критичних ЧР,  $\eta_{\text{чр}}$  – інтенсивність ЧР різко зростає (наприклад, внаслідок утворення дендриту, утворення бульбашок газу), що призводить до різкого руйнування ізоляції та зниження терміну служби.

### 2.2.2 Діагностичні характеристики ізоляційних матеріалів

При оцінці стану ІМ і ступеня небезпеки проблемних місць КЛ застосовуються такі параметри ЧР: уявний розряд  $q_i$ , Кл, потужність  $P$ , Вт, регулярність виникнення  $R_e$ , частота проходження імпульсів  $N$ , найбільше значення розряду, що неодноразово зустрічається, напруга виникнення ЧР  $U_v$ , напруга згасання ЧР  $U_e$  та інші. Кожен із поодиноких ЧР супроводжується проходженням через включення певного заряду  $q$  і призводить до зміни напруги на зовнішніх електродах всього зразка на  $\Delta U_B$ . Співвідношення між зарядом ЧР  $q_{\text{чр}}$ , що здається, і практичним зарядом  $q$  має вигляд

$$q_{\text{чр}} = \Delta U_B C_{\Pi} = q \frac{C_{\Pi}}{C_B + C_{\Pi}}.$$

Значення  $q_{\text{чр}}$  залежить від розмірів включень та доданої напруги. Величина  $q_{\text{чр}}$  залежить від якості ізоляції (від  $10^{-16}$  до  $10^{-6}$ ) і пов'язана з фізичним механізмом розвитку рядів [2]. Зміна напруги  $\Delta U_B$  незначна, так при  $q_{\text{чр}} = 10^{-12}$  Кл і  $C_B = 1000$  пФ маємо  $\Delta U_B = 10^{-3}$  В [2].

Якщо включення має форму прошарку, витягнутого впоперек силових ліній поля, зручно відносити ємності  $C_{\Pi}$  і  $C_B$  до одиниці поверхні включення. Тоді формула (2) може бути представлена в наступному вигляді:

$$q_{\text{чр}} = q \frac{\frac{\varepsilon_{\Pi}}{h - h_B}}{\frac{\varepsilon_{\Pi}}{h - h_B} + \frac{\varepsilon_B}{h_{\Pi}}} = \frac{q}{1 + \frac{\varepsilon_{\Pi}}{\varepsilon_B} \left( \frac{h}{h_B} - 1 \right)}.$$

З формули (3) випливає, що здається заряд ЧР зменшується із збільшенням товщини діелектрика  $h$ . Інтерес є інтегральна кількісна характеристика – рівень ЧР, тобто сумарний заряд  $q_T$  за проміжок часу  $T$ .

Сума здається зарядів часткових розрядів за певний інтервал часу

$$q_T = q_1 + q_2 + \dots + q_n.$$

Для більшості ІМ зі зростанням напруги кількість областей, у яких виникають ЧР, не залишається постійним, а збільшується, що призводить до більш сильної залежності кількості розрядів за секунду та потужності ЧР від напруги.

Таким чином, основну інформацію про джерело ЧР несуть уявний заряд і частота прямування імпульсів ЧР.

Практична потужність ЧР розряду дорівнює:

$$P_{\text{ЧР}} = \frac{1}{t_{\text{И}}} [q_1 \cdot U_1 + q_2 \cdot U_2 + q_3 \cdot U_3 + \dots + q_m \cdot U_m] = \\ = \frac{1}{t_{\text{И}}} \sum_{i=1}^k q_m \cdot U_m,$$

де  $U_1, U_2, \dots, U_T$  - миттєві значення напруги на ізоляції в моменти розрядів;  $q_1, q_2, \dots, q_n$  - величини зарядів ЧР, що здаються, за досліджуваний інтервал часу;  $t_i$  - час виміру ЧР. Величина  $q_m \cdot U_m$  характеризує енергію одиничного розряду,  $P_{\text{ЧР}}$  є втрати енергії на ЧР.

Якщо заряди суттєво різні, то середня потужність

$$P_{\text{ЧР}} = \sum_{i=1}^k \frac{W_{\text{ЧР}(i+1)} + W_{\text{ЧР}i}}{2} (n_{i+1} - n_i),$$

де  $W_{\text{ЧР}i}$  -  $i$ -й рівень енергії.

Таким чином, потужність ЧР залежить від їх інтенсивності (кількість розрядів за період напруги живлення) і від розміру газового включення.

Виникнення кожного одиничного ЧР призводить до виділення в ізоляції об'єкта енергії  $W_{\text{ЧР}}$ . Ця енергія частково витрачається на розігрів випробуваного об'єкта, а частково витрачається на руйнування ІМ. Якщо ємність  $C_I \gg C_{\text{П}}$ , то

$$W_{\text{ЧР}} = \frac{C_{\text{П}} + C_{\text{В}}}{2} (U_{\text{В.ІП}}^2 - U_{\text{В.Г}}^2).$$

Зв'язок між  $q_{\text{ЧР}}$  та  $W_{\text{ЧР}}$  визначається виразом

$$W_{\text{ЧР}} = \frac{q_{\text{ЧР}} U_{\text{ЧР}}}{\sqrt{2}} (1 + \eta).$$

Потужність ЧР залежить від розміру включення [5]. Збільшення розміру включення (а саме збільшення пробивного проміжку  $h_{\text{В}}$ ) є збільшення

початкової напруги іонізації, отже імпульс струму і напруги матиме велику амплітуду, а потужність ЧР зросте. Збільшення потужності розряду викличе інтенсивне зростання включення до електродів, що згодом призведе до повного пробоя ізоляції. Зростання розміру включення відбувається за дендритною структурою.

Інтенсивність ЧР у разі газового включення з більшими розмірами буде меншою, але при цьому його потужність (амплітуда) буде більшою. Аналізуючи потужність імпульсу ЧР за кількістю виділеної теплоти (температурою силових кабельних ліній (СКЛ)), можна говорити про рівень розвитку включення в ізоляції.

Якщо відбувається загальна зміна структури ІМ, наприклад, зміна хімічної структури, пов'язана зі збільшенням  $\text{tg}\delta$ , з можливістю розвитку теплового пробоя, то необхідно мати на увазі насамперед потужність ЧР.

### **Висновки по другому розділу**

Проведений аналіз показав можливість підвищення достовірності виявлення пошкоджень ізоляції з великими перехідними опорами в мережах із ізолюваною нейтраллю на основі порівняльного аналізу струмів витоку в контрольованих приєднаннях, що забезпечує ефективний контроль стану ізоляції в широкому діапазоні значень нерівномірності розподілу ємності між приєднаннями.

## ВИСНОВКИ

Запропоновано метод оперативної оцінки стану ізоляції електричних приєднань 6-10 кВ у мережах із ізольованою нейтраллю на основі порівняльного аналізу струмів витоку в контрольованих приєднаннях. Метод контролю забезпечує ефективне виявлення пошкоджень стану ізоляції при високих значеннях перехідного опору у місці пошкодження ізоляції у широкому діапазоні значень нерівномірності розподілу місткості мережі між приєднаннями.

Досліджені характеристики, що визначають надійну та безвідмовну роботу КЛ методами технічної діагностики. Ці методи дозволяють локалізувати проблемні місця в ізоляційних матеріалах (ІМ), визначити рівень їх небезпеки, оцінити залишковий ресурс КЛ.

На підставі розрахунку характеристик ЧР встановлений зв'язок зміни напруги пробою ЧР  $U_{В.ПР}$  і заряду  $q$ , що здається, від розміру включення до ізоляції, а також зміни напруги пробою ЧР  $U_{В.ПР}$  і заряду  $q_i$ , що здається, від діелектричної проникності ізоляції  $\varepsilon$ . Показано, що оптимальним діагностичним параметром деструкції ІМ є температура. Запропоновано математичну модель прогнозування появи включення, розвитку теплового пробою в ІМ, викликаного ЧР. Наведено методіку діагностування ІМ в умов експлуатації. Аналіз результатів показав, що вимірювання параметрів ЧР дозволяє в комплексі оцінювати вплив ІМ різних факторів і визначати ступінь його деградації. ЧР є мірою ступеня електричного старіння, та інтенсивності зовнішніх впливів температурних та ін. істотний вплив на формування та розвиток включень ізоляції. Встановлено, що напруга запалювання дає можливість визначити товщину включень відповідно до запропонованою формулою, а амплітуда ЧР, що здається, – їх розрядну площу на підставі запропонованої формули. Таким чином, усі геометричні характеристики включень стають відомими.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шуїн В.А., Гусенков А.В. Захист від замикань на землю в електричних мережах 6–10 кВ. М: НТФ "Енергопрогрес", 2001. 104 с. (Бібліотечка електротехніка. Вип. 11 (35)).
2. Кадомська К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапруги в електричних мережах різного призначення та захист від них. Новосибірськ: Вид-во НДТУ, 2004. 368 с.
3. Качесов В.Є., Ларіонов В.М., Овсянніков А.Г. Про результати моніторингу перенапруг при однофазних дугових замиканнях на землю в розподільчих кабельних мережах // Електричні станції. 2002. № 8. С. 38-45.
4. Корогодський В.І., Кужеков С.Л., Паперно Л.Б. Релейний захист електродвигунів напругою понад 1 кВ. М.: Вища школа, 1987. 248 с.: іл.
5. Лихачов Ф.А. Замикання на землю в мережах із ізольованою нейтраллю та з компенсацією ємнісних струмів. М: Енергія, 1971. 152 с.
6. Федосеев АМ, Федосеев М.А. Релейний захист електроенергетичних систем. М.: Вища школа, 1992. 528 с.
7. Бухтояров В.Ф., Мавріцин А.М. Захист від замикань на землю електроустановок кар'єрів. М.: Надра, 1986. 184 с.
8. Захаркін І.В. Про досвід налагодження реле струму РТЗ-51 // Промислова енергетика. 1989. № 3. С. 24-25.
9. Нудельман Г.С., Шевельов ВС Выборчий захист від замикань на землю для розподільчих мереж 6-35 кВ // Енергетик. 2001. № 3. С. 32-33.
10. Олійник С.І., Сафарбаков А.А. Захист від замикань на землю в мережах 6–35 кВ із компенсованою нейтраллю, що реагує на активну складову // Електричні станції. 2002. № 3. С. 60-62.
11. Шалін А.І., Політов О.М. Захист від замикань на землю, що реагує на опір та провідність ланцюгів нульової послідовності // Електроенергетика: Зб. наук. праць. Частина 1. Новосибірськ: Вид-во НДТУ, 2002. С. 74-84.

12. Централізована сигналізація замикань на землю у компенсованих мережах з використанням накладеного струму другої гармоніки // І.М. Сирота, А.Є. Богаченко, О.П. Шаповал та ін. Автоматизація та релейний захист енергетичних систем. Київ, 1981.
13. Шуцький В.І., Жидков В.О., Ільїн Ю.М. Захисна шунтування однофазних пошкоджень електроустановок. М.: Вища школа, 1986. 151 с.
14. Про параметричні методи локалізації однофазних замикань у розподільчих мережах / Л. В. Богдашева, В. Є. Качесов // Науковий Вісник НДТУ. 2006. № 3 (24).
15. Борухман В.А. Про експлуатацію селективних захистів від замикань на землю в мережах 6–10 кВ та заходи щодо їх удосконалення // Енергетик. 2000. №1. С. 20-22.
16. Вайнштейн Р.А., Головка С.І. Про гармонійний склад струмів нульової послідовності в мережах з компенсацією ємнісних струмів при замиканнях на землю через дугу, що перемежується // Известия вузів. Енергетика. 1978. № 12. С. 14-19.
17. Вайнштейн Р.А., Головка С.І., Григор'єв В.С. та ін. Захист від замикань на землю у компенсованих мережах 6–10 кВ // Електричні станції. 1998. № 7. С. 26-30.
18. Головка С.І., Вайнштейн Р.А., Юдін С.М. Селективна сигналізація однофазних замикань та вимірювання розладу компенсації в мережах 30, 35 кВ // Електричні станції. 2000. № 7. С. 33-36.
19. Шалін А.І., Щеглов А.І. Концепція релейного захисту від замикань на землю у мережах 35 кВ із резистивно-заземленою нейтраллю // Режими заземлення нейтралі мереж 3–6–10–35 кВ: Доповіді науково-технічної конференції. Новосибірськ: ГЦРО, 2000. С. 149-160.
20. Буличов А.В., Соловійов І.В., Агельський А.В. Спосіб централізованого селективного захисту від замикань на землю у розподільній електричній мережі. Патент на винахід № 2565060, H02H 3/16 (10.09.2013) // Бюлл. № 29. Опубл. 20.10.2015.