

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Прогнозування ресурсу силових кабелів зі зшитого поліетилену

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи ЕТМ-61

спеціальності 141 – Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)

Губіцький А. М.

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

Наконечний М. С.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

Мовчан Л. Т.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

(підпис)

Тарасенко М. Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

Романюк Л. А.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) _____
(прізвище та ініціали)
« » 20__ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Губіцькому Антону Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Прогнозування ресурсу силових кабелів зі зшитого поліетилену

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» листопада 2023 року № 4/7-1040

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Фізичні процеси в кабелях із зшитого поліетилену

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Проектно-конструкторський розділ

3 Розрахунково-дослідницький розділ

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

РЕФЕРАТ

Губіцький А. Прогнозування ресурсу силових кабелів із зшитого поліетилену.141-Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-61. – Тернопіль : ТНТУ, 2023

Сторінок – 64, рисунків – 13; таблиць – 5; джерел – 15.

У дипломній роботі систематизовано інформацію з даної теми. Ця тема актуальна в сучасному світі, тому що в даний час перед електроенергетикою поставлено завдання масової цифровізації. Аналіз даних, отриманих за допомогою поточної моделі прогнозування залишкових ресурсів, стає можливим у режимі реального часу для з'ясування стану ізоляції в кабельному виробі, в результаті чого прийняти рішення про подальшу експлуатацію кабелю, або відправка його на планове технічне обслуговування. Ключові слова: кабель, струмове навантаження, математична модель, прогнозування, температура.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Основні конструктивні елементи кабелів із зшитого поліетилену і їх призначення	9
1.2 Конструкція кабелів з зшитого поліетилену	12
1.3 Властивості матеріалів для кабелів з зшитого поліетилену	15
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Вибір методу діагностики та контролю стану ізоляції кабельні лінії із зшитим поліетиленом	19
2.2 Фізика процесу старіння матеріалів ізоляції	20
2.3 Спрощена модель розрахунку терміну служби ізоляції	23
2.4 Висновки до розділу	31
3. РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	34
3.1 Розробка математичної моделі для прогнозування залишкового терміну служби	34
3.1.1 Електричний розрахунок	35
3.1.2 Вибір товщини екрана провідника	40
3.1.3 Розрахунок електричної міцності ізоляції кабеля	40
3.1.4 Вибір ізоляції та оболонки кабелю	42
3.2 Тепловий розрахунок	43
3.2.1 Розрахунок опору струмопровідної жили	43
3.2.2 Розрахунок робочої ємності	45
3.3 Розрахунок залишкового ресурсу при заданих умовах експлуатації	45
3.4 Оцінки похибки	51
3.5. Висновки до розділу	52
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	54
4.1 Загальні вимоги електробезпеки при прокладанні кабельних ліній	54
4.2 Захист персоналу при експлуатації та обслуговуванні кабельних ліній	56

4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики під час воєнного стану	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	63

ВСТУП

Кабельна продукція використовується для передачі інформаційних сигналів і електричної енергії на необхідну відстань, тому вони беруть участь в роботі різноманітних електричних і радіочастотних прилади, електронні схеми і схеми. Для експлуатації будь-яких технічних пристрій, так чи інакше, потребує живлення, отже, жодна з вони не можуть повноцінно працювати без використання кабелів і проводів, які, в свою чергу, утворюють структурні системи для електроживлення і контроль роботи цих пристроїв.

Необхідність створення принципово нових видів кабельної продукції з найкращими показниками обумовлений технічним прогресом у всіх галузях. Таким чином, зростає потреба в кабельній продукції.

Характерні особливості кабельної техніки, такі як застосування висока частота, робота з високою напругою, підсилення переданої потужності і збільшення струмового навантаження, розробка нових видів спеціалізованих кабелів для роботи у середовищах високого тиску, перепадів температури, впливу агресивного середовища, призводять до підвищення вимог, що пред'являються до кабельної продукції.

Попит на електроенергію зростає, розробляються нові види силові кабелі. Для підвищення надійності кабельних ліній **актуальним** є зниження ймовірність коротких замикань, кожне з яких призводить до економічних витрат. Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є проведення контроль і оцінка стану ізоляційних матеріалів кабелю, чого можна досягти певними методами. Для того, щоб залишковий термін служби прогнозувався в залежності від часу експлуатації, до того, як ізоляція вийде з ладу, необхідно описати усі процеси, що стосуються кабелю. Це вирішується за допомогою математичних моделювання процесу старіння ізоляції кабельної продукції.

Метою дослідження є розробка сучасної моделі прогнозування залишкового ресурсу силового кабелю, ізолюваного зшитим поліетиленом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступне :

1. Розгляд основних конструктивних елементів і матеріалів кабелів із зшитого поліетилену та їх призначення;
2. Розрахунок залишкового ресурсу кабелю, при заданих умовах експлуатації;
3. Оцінка ступенів факторів впливу на прогнозований залишковий ресурс кабелю

Об'єкт дослідження – силовий кабель із ізоляцією із зшитого поліетилену

Предмет дослідження - процес старіння та руйнування ізоляції кабеля із зшитого поліетилену та фактори що впливають на ці процеси.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в можливості застосування запропонованої математичної моделі, для оцінки терміну служби кабелю.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості розрахунку залишкового ресурсу кабеля, при заданих умовах експлуатації.

Апробація результатів магістерської роботи.

Вибрані положення роботи доповідалися на XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів. «Актуальні задачі сучасних технологій» – Тернопіль 6-7 грудня 2023

Структура роботи.

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (15 найменування).

Загальний обсяг текстової частини: 64 сторінки, 5 таблиці, 13 рисунків.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Основні конструктивні елементи кабелів із зшитого поліетилену і їх призначення

Розвиток середньовольтних розподільчих мереж встановлює необхідність експлуатації кабельної продукції, здатної передавати високе струмове навантаження. В останні роки проводилася заміна кабелів з просоченою папером ізоляцією до термостійкої екструдованої Кабелі із зшитим поліетиленом. У розвинених країнах Північної та Південної Америки і Також в європейському регіоні значна частина ринку силових кабелів займають кабелі, ізольовані зшитим поліетиленом.[1]

Переваги кабелів з пластиковою ізоляцією:

- Межа робочої температури вказана в ширшому діапазоні ніж кабелі з паперовою ізоляцією, що дозволяє значно збільшити потужність, що передається.
- Достатня довговічність в аварійних режимах, таких як перевантаження або коротке замикання;
- Можливість прокладки кабелів на об'єктах з різною висотою;
- Ізоляційні матеріали не містять важких наповнювачів, масел і свинцю, що значно прискорює монтаж, а також знижує фактори, що негативно впливають на навколишнє середовище;
- Висока експлуатаційна надійність і більш низькі економічні витрати виходу з аварійних режимів;
- Завдяки своїй конструкції мають меншу вагу і радіус вигину;
- Можливість виготовлення кабелів великої довжини;
- Одножильні та трижильні кабелі з поліетиленовою оболонкою.

Покращена механічна та термічна стійкість кабелів із зшитого поліетилену пов'язані з їхньою молекулярною структурою. На етапі

вулканізації або «зшивання» ізоляційного матеріалу нові зв'язки створюються при розподілі молекул поліетилену.

Частка кабелів із зшитим поліетиленом на російському ринку Кабельна продукція зараз зростає, таким чином, Спостерігається зростання виробництва і споживання кабелів ХРЕ.

Європейських регіонаї - PE - PolyEthylene, X - Cross-link або скорочено зшитий поліетилен.

Порівняння електромеханічних характеристик кабелів з ізоляцією

Переваги кабелів XLPE над ППІ кабелями: [2,3]

- Висока потужність, що передається (струмове навантаження) в залежності від умови прокладки кабелю (в 1,4-1,5 рази вище);

- Вищі довгостроково допустимі температури нагріву кабеля;

- При аварійних режимах (струми короткого замикання) спостерігається відносно високий термічний опір. Це пов'язано з ізоляційним матеріалом, так як кабелі ХРЕ мають більш високу максимальну граничну допустиму температуру кабелю;

- Підвищена механічна стійкість до динамічних і статичних навантажень;

- Низькі питомі пошкодження кабелів ХРЕ (в 4-5 разів нижче, ніж у кабелі БПІ);

- Більш тривалий залишковий термін служби кабелю (згідно із заявленими даними з технічного паспорту - більше 40 років);

- Меньше значення радіуса вигину, ваги, діаметра кабелю в плані ізоляції, відсутність броньованої оболонки полегшує монтаж кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену;

- Прокладка кабелю ХРЕ можлива при низьких температурах до -25 °С, без попереднього прогріву конструкцій, це пов'язано з наявністю полімерних матеріалів в ізоляції та оболонці;

-В конструктивних елементах кабелю ХРЕ відсутні рідкі наповнювачі, що дозволяє скоротити вартість і час монтажних робіт;

-Вони досить екологічні за рахунок відсутності технічних масел і їх витоку в елементах кабелю ХРЕ при пошкодженні не забруднюють навколишнє середовище;

-На відміну від кабелів з ізоляцією ППШ, гігроскопічність основних елементів кабелю ХРЕ мають менше значення;

-Ізоляція має високі діелектричні характеристики;

-При проектуванні траси можливе укладання на різних висотних рівнях.

Головною відмінною рисою кабелів ХРЕ є принципово новий різновид ізоляції із зшитого поліетилену. Властивості поліетилену, як засіб ізоляції пристроїв відомі давно.

Звичайний термопластичний поліетилен має серйозні недоліки, один з основних значне зниження електричних характеристик при температурах, близьких до температури плавлення полімерного матеріалу. При досягненні температури 80 °С починаються незворотні зміни в структурі ізоляції: починає втрачати форму ізоляція, тангенс кута значно зменшується, діелектричні втрати та електрична міцність також. Зшита ізоляція поліетилену зберігає свою форму, електричну і механічну міцність навіть при 130 °С. Термін «зшивання» або «вулканізацією» мається на увазі обробка поліетилену на молекулярному рівні. Перехресні зв'язки, що утворюються в процесі зшивання між макромолекулами поліетилену, створюють тривимірну структуру, яка визначає високі електричні та механічні показники матеріалу, меншу гігроскопічність, більший робочий діапазон температур.[3]

У світовій кабельній промисловості, у кабелях використовуються дві технології зшивання, принципова відмінність який знаходиться в реагенті, за допомогою якого відбувається процес зшивання поліетилену. Технологія найбільш поширена - пероксидного зшивання, коли зшивання поліетилену відбувається з застосування спеціальних хімічних речовин – пероксидів у

навколишньому середовищі з нейтральними газами при певних температурах і тиску. Така технологія дозволяє отримати достатній ступінь зшивання на усій товщині утеплювача і стежити за тим, щоб не було повітряних включень. Крім хороших діелектричних властивостей, він також має більший, ніж кабелі з іншим матеріалом ізоляції діапазон робочих температур і відмінні механічні характеристики. Технологія пероксиду використовується в виробництві кабелів середньої та високої напруги. Менш поширене зшивання силанолом, при якому поліетилен спеціальні суміші (силани) додаються для забезпечення зшивання при нижчих температурах. Сфера застосування цієї дешевої технології охоплює кабелі низької та середньої напруги.

1.2 Конструкція кабелів з зшитого поліетилену

Існує два варіанти кабелів ХРЕ – трижильні та одножильні. В основному кабелі ХРЕ випускаються одножильними (рис. 1.1). Зовнішній вигляд одножильного кабелю ХРЕ:[4]

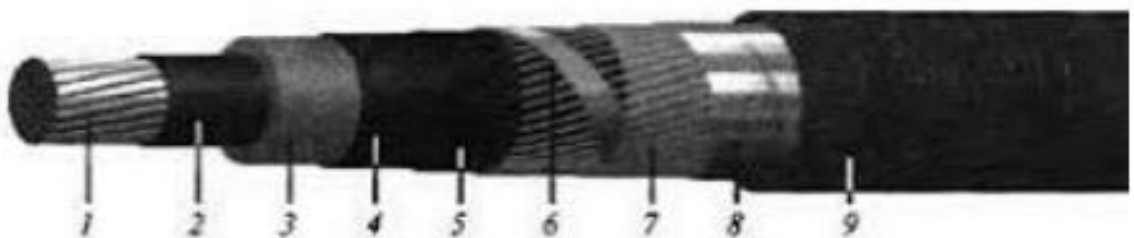


Рисунок 1.1– Одножильний кабель

- 1 - кругла багатожильна герметична струмопровідна жила,
- 2 — екран уздовж провідника з напівпровідний зшитий поліетилен,
- 3 – зшита ізоляція з поліетилену
- 4 — екран на ізоляції з напівпровідного зшитого поліетилену,

- 5 — напівпровідна стрічка, що розділяє шар, або напівпровідна водоблокуюча стрічка,
- 6 — екран з мідного дроту, скріплюється мідною стрічкою,
- 7 — розділовим шаром з двох стрічок кріпіванная папір, прогумована тканина, полімерна стрічка або водоблокуюча стрічка,
- 8 — розділовий шар алюмінієво-поліетиленова або слюдяна стрічка,
- 9 — оболонка з поліетилен, полівінілхлоридний пластикат.

Відмінна риса трижильного варіанту кабелю ХРЕ є наявність екструдованого міжфазного наповнювача з поліетилен або полівінілхлоридний (ПВХ) компаунд (рис. 1.2).[5]



Рисунок. 1.2 – трьохжильний кабель

Використання одножильних кабелів ХРЕ дає можливість забезпечити підвищену надійності електропостачання за рахунок різкого зниження ймовірності міжфазних коротких замикань. Ймовірність одночасного руйнування в одному місці ізоляції двох конструктивно не з'єднаних між собою одножильних кабелів (з'єднувальні або кінцеві муфти) відповідає ймовірності міжфазного пошкодження ошиновки з ізольованими шинопроводами, тобто дуже маленькими. Ймовірність однофазних замикань на землю при використанні одножильних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену набагато менше, ніж при використанні трижильних кабелів ПП.

Це досягається як самою конструкцією одножильних кабелів ХРЕ, а також кращими діелектричними властивостями ізоляції. Одножильна конструкція кабелів ХРЕ дозволяє виконувати поперечний переріз струмоведучих жил до 800 мм. Кабелі з таким перерізом успішно конкурують з шинами, що використовуються в системах електропостачання потужних підприємств.

Екранування кабелю необхідне для електромагнітної сумісності кабелю з різними зовнішніми впливами і забезпечення симетрії електричного поля навколо жили кабелю, отже, для поліпшення умов роботи ізоляції. Внутрішні екрани виготовлені з напівпровідного пластику, зовнішній екран - з мідних дротів і смуг.

Основне завдання, яке вирішує екран з мідного дроту, - це вирівнювання електричного поля, що діє на основну ізоляцію кабеля (ізоляцію жили), тобто для того, щоб екран виконував свою функцію, він повинен бути заземленим. Крім металевого екрану, конструкція має напівпровідникові екрани: один наноситься на зовнішню поверхню провідника, а інший - поверх основного ізоляційного шару кабелю на внутрішній поверхні металевого екрана. Напівпровідникові екрани забезпечують локальні вирівнювання напруженості електричного поля на негладкій поверхні провідника проводу і металевого екрану.

Ізоляція екрану призначена для запобігання попадання води всередину кабелю, через обмотку екранних проводів в основну ізоляцію. Надійність кабелю багато в чому залежить від цілісності його оболонки. Зовнішня захисна оболонка захищає внутрішні елементи кабелю від попадання вологи і механічних пошкоджень при його монтажі і роботі. Зовнішні оболонки кабелів ХРЕ виготовляються з поліетилену або високоміцного полівінілхлоридного пластиката.

Буквено-цифрові позначення (маркування) для кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену:

А — алюмінієвий провідник, без позначення — мідний струмоведучий провідник,

PV – ізоляційний матеріал – зшитий (вулканізований) поліетилен,

П або С – оболонка з поліетилену або ПВХ пластикату,

у — армована поліетиленова оболонка збільшеної товщини,

нг – оболонка з полівінілхлоридного пластикату зниженої горючості,

Нгд- являє собою корпус з полівінілхлоридного пластикату зі зниженими димо- і газовиділеннями,

д - поздовжнє ущільнення щитка водоблокуючими стрічками,

1 або 3 - кількість провідників,

50—800 — поперечний переріз провідника, мм²,

Гж- горюча ліквідація провідника, 2 16—35 — переріз екрана, мм,

1-500 - номінальна напруга, кВ.

Приклад позначення: АПвПг 1х240/35-10 – кабель з алюмінієвою жилою (А), ізоляція ПВХ (ПВ), поліетиленова оболонка (П), Герметизація екрана (г), суцільна (1), поперечний переріз провідника 240 мм², поперечний переріз екрану 35 мм², номінальна напруга 10 кВ.

Силові кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену використовуються в будівництві кабельних ліній електропередач під землею, в траншеях, під дном річок і озер, а також в ґрунтах різних категорії. Кабелі призначені для передачі та розподілу електричної енергії при номінальній напрузі 10 кВ частотою 50 Гц трифазної мережі із заземленою нейтраллю та прямим зв'язком з повітряними лініями з лінією на трасах з необмеженою різницею рівнів.

1.3 Властивості матеріалів для кабелів з зшитого поліетилену

Своїми властивостями кабелі з ізоляцією ХРЕ є унікальні через ізоляційний матеріал. Поліетилен в даний час є одним з найбільш часто використовуваних ізоляційних матеріалів у виробництві кабелів. Але в термопластичного поліетилену є і серйозні недоліки, головним з яких є різке

погіршення механічних властивостей при температурах, близьких до температур плавлення. Вирішенням цієї проблеми стало використання кабелів із зшитого поліетилену.[6,7]

Під терміном «зшивання» мається на увазі обробка поліетилену на молекулярному рівні. Перехресні зв'язки, що утворюються в процесі зшивання макромолекул поліетилену, створюють тривимірні конструкції, що характеризуються високою електричною і механічною міцністю матеріалу, меншою гігроскопічністю, більшим діапазоном робочих температур.

Сировиною для зшитого поліетилену є високоякісний поліетилен щільність і підвищена міцність при звичайній лінійній структурі. Зшивання полягає в тому, що при високій температурі і тиску, а також під впливом електронного опромінення, а при певному хімічній сполуки об'єднують молекулярні ланцюги поліетилену в єдину тривимірну структуру.

Крім підвищеної ударної в'язкості і ударної міцності, зшитий поліетилен має надзвичайно корисні властивості, які недосяжні для інших матеріалів, які визначають основні напрямки його застосування. При прокладанні в ґрунті використовується оболонка з високої щільності, що забезпечує необхідний захист кабелю від механічних пошкодження, як при укладанні, так і в процесі експлуатації. Якщо необхідна герметизація екрану, використовуються два окремих шари водоблокуючих стрічок під мідним екраном і над ним, з перекриттям. При прокладанні кабелів в кабельних установках використовуються оболонка з полівінілхлоридного пластикату зі зниженою горючістю.

Зшитий поліетилен може вироблятися за різними технологіями зміни температури, тиску реакції, що відбувається, і супутніх речовин. При цьому отримуємо матеріали, які відрізняються за своїми властивостями. В електроізоляційній промисловості використовується:[8]

1. PEХb – поліетилен, «зшитий» хімічним силаном (або силанольним) методу. При його виробництві використовуються речовини кремневодню який

при підвищенні температури до 80-90 С бере участь в гідролізі шляхом зв'язування бічних отворів полімерних макромолекул. Порівняно дешевий метод, він дає близько 65% зшивання. Він був дуже поширений на початковому етапі використання поліетилену в якості ізоляції кабелю, але дає нерівномірний розподіл структури по всьому об'єму.

2. РЕХа «перехресні зв'язки» в присутності перекису водню, що викликає називається «пероксидним», коли температура підвищується до 400 С і Тиску 8-9 атм. Цей спосіб модифікації поліетилену більш складний і дорогий, але дає до 80% зшитих молекул і порівняно однорідний розподіл ключових фігур по об'ємі матеріалу. Отримав найбільшого використання в якості високовольтної ізоляції з великою товщиною.

Ізоляція РЕХб допускається тільки для кабелів, призначених для напруги не більше 1 кВ. При більш високій напрузі він має більш низький електричний опір, часто ламається і швидко приходить в непридатність. Для ізоляції кабелів напругою 10-35 кВ і більше використовується тільки матеріал РЕХа.

Ізоляція із зшитих зразків поліетилену використовується у виробництві одножильних і трижильних кабелів, що використовуються як в одиночних, так і в групових прокладках на відкритих місцях, в кабельних лотках, під землею. Товщина ізоляції коливається від 3,4 до 35 мм в поперечному перерізі кабелів від 35 до 3000 мм² і струмом при напрузі до 550 кВ .

Вибір матеріалу екрану залежить від того, чи є поле який впливає на кабельний виріб електрично або магнітного типу. В цілому, магнітні матеріали забезпечують більшу поглинаючу здатність випромінюваної електромагнітної енергії, а також хороші провідники, такі як мідь або алюміній мають високу відбивну здатність.

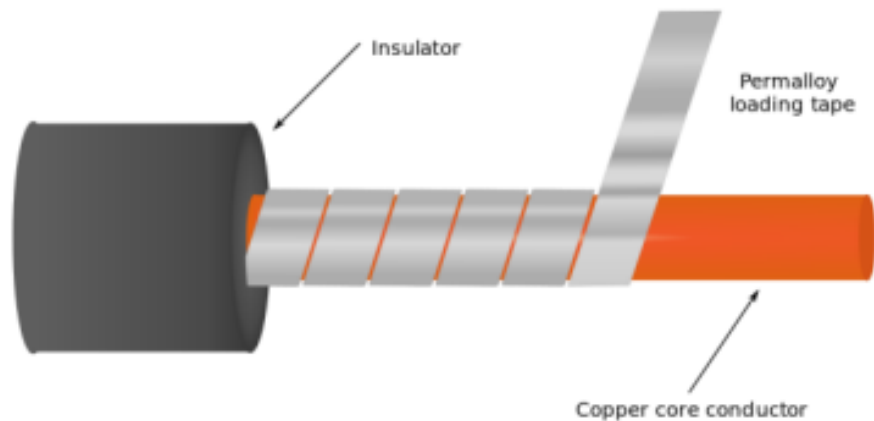


Рисунок 1.3 – Схема екранування кабелю пермалоєм

Останні більш ефективні при екрануванні електричних полів, але їх ефективність знижується зі збільшенням частоти (рис 1.3). У діапазоні низьких частот і хорошого екранування, магнітних полів можуть бути використані сплави з більшою магнітною проникністю, наприклад, латунь. Як матеріал магнітних екранів в слабких полях, сплави з високою магнітною проникністю. Пермалої, що відносяться до ковких сплавів з високою магнітною проникністю, добре обробляються різанням і штампуванням. За складом пермалої поділяються на низьконікелеві (40-50% Ni) і високонікелеві (72-80% Ni). Для поліпшення електромагнітних і технологічних властивостей пермалою часто легують молібденом, хромом, кремнієм, кобальтом, міддю та іншими елементами. Основні показники електромагнітної якості цих сплавів є значеннями початкової і максимальної магнітної проникності. Коерцитивна сила в пермалої повинна бути максимально малою, а питомий електричний опір ρ і намагнічення насичення якомога більшим.[9]

Низьконікелевий пермалой використовується для виготовлення магнітних екранів, що працюють в умовах слабких постійних магнітних полів. Легують кремнієм і хромом, низьконікелевий пермаллой використовується при більш високих частотах.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір методу діагностики та контролю стану ізоляції кабельні лінії із зшитим поліетиленом

Для забезпечення надійної роботи силових кабелів необхідно оглянути їх перед введенням в експлуатацію. Превіряти можна струмопровідні жили кабелю (для забезпечення з'єднання джерела електричної енергії зі споживачем) та ізоляція (для уникнення коротких замикань). При введенні в експлуатацію кабельних ліній 6-10 кВ ізоляція із зшитого поліетилену в процесі експлуатації може здійснюватися

Наступні тести:

- 1) Перевірка цілісності та фазировки жил кабелю.
- 2) Вимірювання опору ізоляції. Величина опору нестандартизована, вимірювання опору проводиться до і після випробування підвищеною напругою.
- 3) Випробування на номінальну або перенапругу випрямленого струму (в деяких випадках проводиться випробування напругою) промислової або наднизької частоти (0,01-0,1 Гц).
- 4) Вимірювання розподілу струму по одножильних кабелях. Нерівномірність розподілу струмів по кабелях не повинна бути більше 10%.
- 5) Контроль стану антикорозійного покриття, якщо воно є.
- 6) Вимірювання опору заземлення.

Ізоляційні матеріали більш схильні до псування під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, тому найбільш слід приділити увагу випробуванню ізоляції. Стандартизована випробна напруга є руйнівною для ізоляції, оскільки, крім випалювання наявних недоліків (що утворилися в процесі виробництва або в результаті неякісного монтажу) прискорюється процес руйнування теплоізоляційного матеріалу, що призводить до утворення нові дефекти ізоляції та зменшення терміну служби. Крім того, при використанні

напруги постійного струму для перевірки кабелів виготовлених із зшитого поліетилену, вони можуть накопичуватись об'ємні заряди, наявність яких може призвести до швидкого виходу кабелю з ладу. У зв'язку з цим зараз спостерігається тенденція до впровадження неруйнівні методи контролю та діагностики ізоляції, які бувають:

- 1) Вимірювання часткових розрядів в ізоляції;
- 2) Вимірювання тангенса діелектричних втрат;
- 3) Вимірювання напруги/струму процесів поляризації/деполяризації діелектрика.

2.2 Фізика процесу старіння матеріалів ізоляці

Частковий розряд - це малопотужний електричний розряд, який шунтує лише частину ізоляції, і не викликає значних змін напруги між електродами. Як правило, часткові розряди виникають ізольовано в місці локалізації внутрішніх дефектів (бульбашки газу, різні мікрочастинки, тверді домішки) причина того, що в цих місцях спостерігається неоднорідність електричного поля, напруга якого всередині дефекту може бути набагато вище, ніж в ізоляційному матеріалі.

Як правило, діелектрична міцність домішок значно менше діелектричної міцності ізоляції, тому в місці дефекту є місцевий електричний пробій. Джерела високоінтенсивної частових розрядів зазвичай є дендритами – деревоподібними каналами неповного прориву, розвиваються з неоднорідностей, що утворюються в ізоляції під час виготовлення та експлуатації в результаті знищення та/або деполімеризації матеріалу за рахунок природного старіння. Крім того, джерелами часткових розрядів можуть бути місця неякісного монтажу, наприклад, кабельні муфти. Внутрішні дефекти ізоляції утворюються як наслідок недоліків технології виготовлення, в процесі експлуатації під впливом електричного поля виникають часткові розряди, що спричиняє зростання дендритів. Для

газонаповнених дефектів істотне значенням є в тому, що для виникнення часткових розрядів в газі вимагається менша напруженості електричного поля, так як діелектрична проникність газів менше проникності рідини та тверді тіла. Як наслідок, інтенсивність часткових розрядів може бути значно вище на початкових стадіях розвитку дефекту. Мікропори в ізоляції можуть бути заповнені водою, наявною в ізоляції у вигляді розчину або проникаючи в ізоляцію з навколишнього середовища.[10-12]

До неруйнівних методів контролю стану ізоляції відносять також складання моделей і подальший розрахунок основних параметрів кабелю з з урахуванням умов його експлуатації. Ці методи дають можливість оцінити стан ізоляції кабельного виробу в реальному часі незалежно від терміну його служби. Основні аспекти у виробництві та рішення задачі прогнозування часу роботи до погіршення ізоляції - це опис фізики перехідних процесів, відбуваються за допомогою математичного апарату або моделювання процесу старіння за допомогою спеціально розроблених програм.

При експлуатації кабелю в номінальному режимі відбувається поступове погіршення ізоляційних властивостей. Цей процес викликаний нелінійними зміни динамічних характеристик, такі як вплив зовнішніх магнітних і електричних полів, різниця температур, механічний вплив, викликаний динамічними навантаженнями на розтягнення і стиснення, вплив факторів навколишнього середовища (світло, радіації), вологість, вплив інертних газів.

На рівні хімічних реакцій, процес впливу зовнішніх впливів на швидкість розпаду молекули можна описати за допомогою закону Арреніуса:

$$K_i = K \cdot e^{\frac{-wa}{kT}}, \quad (2.1)$$

де, K_t - середня ймовірність розпаду однієї молекули за одиницю часу, змінна відповідає за швидкість хімічних реакцій;

K - коефіцієнт, матеріально-залежних речовин, що беруть участь в реакції;

W_a – Енергія активації;

k - еталонне значення постійної Больцмана.

Для кращого розуміння цього явища наводиться окремий випадок старіння ізоляції в електростатичному полі з високою інтенсивністю. На одиничну ділянку ізоляції впливає електричне поле, в результаті в цій області відбуваються часткові розряди (рис.2.1). Відбувається нелінійне наростання часткових розрядів і періодичне їх повторення Вони починають процес руйнування ізоляції, так як в ній міститься мікротріщини. При досягненні максимально допустимого значення діелектрична міцність втрачається. Для визначення та розрахунку стану ізоляційного матеріалу був виведений закон, що описує механізм утворення і розділення дефектів діелектричного матеріалу. Для досліджуваного зразка був обраний поліетилен.

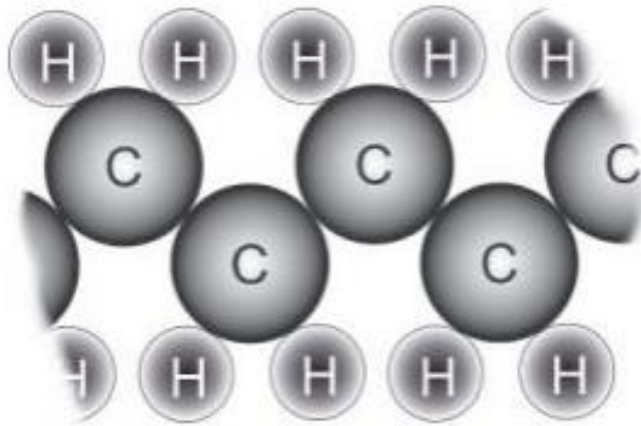


Рисунок 2.1 – Будова молекули поліетилену

У хімічній формулі поліетилену при пробі зв'язки між атомами вуглецю розриваються між собою і утворюється так званий вільний атом вуглецю, який може спричинити появу бульбашок. Отриманий незв'язаний вуглець вибивається як позитивний заряджений іон H^+ , що в свою чергу сприяє іонізації та подальшому руйнуванню молекулярної структури поліетилену в цілому і згодом, захоплюючи вільний електрон, він стає

нейтральним, а вуглець стає провідною мікрочастинкою. У той же час сусідні атоми утворюють зв'язки утворюються між собою. Причини старіння поліетиленової ізоляції неминучі, оскільки як технологічні, так і експлуатаційні. До таких дефектів можна віднести повітряні порожнини мікророзміру, сторонні домішки, тріщини і вони з'являються в ізоляції в процесі її виготовлення або укладання і функціонування кабелів за рахунок, наприклад, періодичного стиснення і розширення матеріалу в режимах навантаження. Ці мікропорожнечі заповнюються через вироблення водяної пари і наявності летких продуктів в процесі зшивання та екструзії ізоляції.

2.3 Спрощена модель розрахунку терміну служби ізоляції

Спрощена модель поліетиленової ізоляції у вигляді зрізу 100×100 молекули CH_2 , в яких може відбуватися розпад під впливом електричного поля. Уявіть собі квадрат (100×100) у вигляді системи координат, де координати пробою визначаються випадково. Окремим випадком вважається старіння ізоляція в електричному полі високої інтенсивності. Процес старіння відбувається за рахунок розвитку часткових розрядів, саме вони провокують появу в ізоляції мікротріщин, які призводять до пробою (рис. 2.2). Для визначення ступеня руйнування ізоляції, що призводить до пробою, використовується закон розподілу появи дефектів у діелектрику.

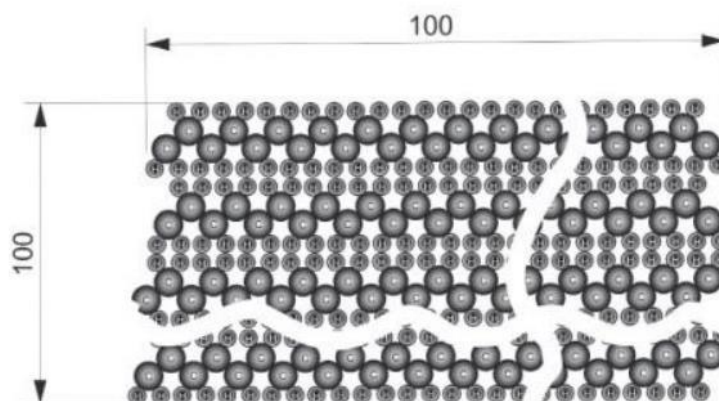


Рисунок 2.2 – Модель ізоляції у вигляді зрізу молекул 100×100

При використанні випадкової функції вибирається на основі робочої напруги кабелю 10 кВ та товщини ізоляції, координати зруйнованих клітинок, і коли 10 клітинок зі 100 руйнуються в одному напрямку вважалось, що стався пробій. Очевидно, що ця модель потребує вдосконалення (рис. 2.3). Перш за все, необхідно визначитися з критерієм пробою ізоляції, тобто ступенем руйнування матеріалу відповідно до радіусу ізоляції для пробою. Відповідно до більшості випадків пробій ізоляції відбувається в діапазоні від 300 до 500 молекул.



Рисунок 2.3 – Графік ймовірності пробою ізоляції ділянки на кількість проколотих молекул СН

Для розрахунку береться в середньому 400 молекул. Розмір поля для розрахунків - 100×100 клітин, тобто всього 10 000 молекул в польових умовах. Таким чином, щоб пробити ізоляцію, досить пробити 4% молекул, за умови, що при кожному частковому розряді буде пробиватися тільки одна молекула, тоді як в дійсності при одноразовому частковому розряді може бути пробита більша кількість молекул. [13]

Статистична модель для визначення критичного ступеня відмови ізоляційного шару. Аналіз даної моделі показав, що однією з найбільш

вірогідних форм виникнення дефекту - еліптичний, розподілений по радіусу кабелю, так само дефекти ізоляції, які призводять до пробую, зазвичай дендритні утворення — структурні канали в ізоляції наповнені рідинами, твердими речовинами або газами (рис. 2.3). Моделювання різних розмірів дефекту показали значний запас електричної міцності ізоляційного матеріалу. Для створення напруженості електричного поля вище пробивного, прийняте 6 кВ/мм для зістареного кабелю, необхідно зруйнувати близько 78% ізоляції по радіусу, згідно зображення електричного поля та розподіл напруги електричного поля в зоні дефекту.

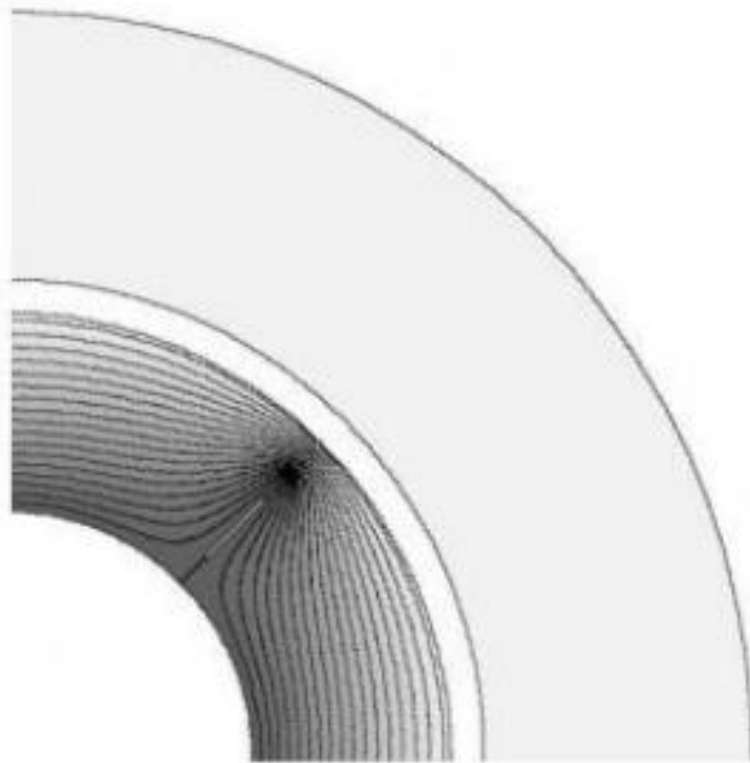


Рисунок 2.3 – Електричне поле дендритового кабелю

Для виконання розрахунку в трьох вимірах пропонується використовувати паралелепіпед зі сторонами, пропорційними розмірам ізоляції по довжині кабелю, товщини і внутрішньої площею ізоляції. Використання такої форми дозволить врахувати можливість розростання дендритів тільки вздовж радіусу. Для визначення пропорційності сторін необхідно розрахувати розміри кожної сторони. Однак для розрахунку

необхідно перевести отриману модель в об'ємний масив елементів для проведення розрахунків. Результат моделювання показав, що щільність ймовірності пробою змінюється відповідно до закону розподілу Вейбулла, яке виражається формулою:

$$f = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$$

(2.2)

де, k - коефіцієнт форми, а λ - коефіцієнт масштабу.

Для математичного розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю необхідно знати функцію ймовірності пробою в залежності від ступеня руйнування матеріалу. Для розподілу Вейбулла це виглядає так:

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, \quad (2.3)$$

В результаті моделювання було встановлено, що при руйнуванні матеріалу, до 35,5%, ймовірність пробою становить менше 1%, після вона він починає стрімко зростати. Таким чином, при руйнуванні матеріалу до 35,5% ймовірність безвідмовної роботи ізоляції дуже висока. В районі від 35,5 % до 78% ймовірність пробою значно зростає, що свідчить про те, є можливість частого виникнення дефектів ізоляції.

3. Методика визначення кореляційного зв'язку між характеристиками ізоляції кабелю і характеристиками безпосередньо пов'язані з термін служби кабелю.

Основна причина виходу з ладу поліетиленових кабелів ,що знаходяться під тривалим впливом підвищеної температури і механічних навантажень (термомеханічне старіння) при експлуатаційних напруженнях, полягає в розтріскуванні оболонки і ізоляції кабелю. Кількісно тріщиностійкість оцінюється як температура холодостійкості T_x . Встановлено, що скорочення терміну служби кабелів з поліетиленовою ізоляцією в умовах експлуатації ізоляції посилені. Структурний тепловий рух елементів в полімерах і їх рухливість визначають релаксаційні переходи, які визначають методами

релаксаційної спектроскопії. Перш за все, структурна необхідність проявляється при вивченні температурно-частотних спектрів діелектричних і механічних втрат. Це було підтверджено експериментально. Спектри механічних втрат відображають ті ж процеси молекулярного руху, що і діелектричні. Для діелектричних спектрів можна виділити три основні переходи: Низькотемпературні α -максимальні втрати діелектрика визначаються рухливістю окремих груп макромолекул; β -максимум пов'язаний з сегментарною рухливістю, вона вище температури твердіння полімера. Експериментально доведено, що α - і β - максимуми знаходяться при мінусові температури за Цельсієм і не дуже інформативні. α - максимум пов'язаний з сегментарною рухливістю полярних груп уздовж поверхні кристалітів, виявляється при підвищених температурах і є інформативним. З часом в зоні α релаксації відбувається збільшення тангенса кута діелектричних втрат на максимумі залежності від температури і частоти і, найголовніше, зміщення місця максимуму тангенса дельта на температурні залежності в область більш високих температур ΔT_m приблизно на 35 °С від початкової температури до повного вичерпання ресурсу, а від частотних залежностей – в область низьких частот на частоті близько 750 Гц. Відхилення від місця розташування від вихідного стану ΔT_m або Δf_m є кількісною мірою оцінка процесу старіння. Експериментально встановлено, що між вибрані параметри – критерії ΔT_m або Δf_m і загальноприйняті критерієм – температура холодостійкості – є пряма кореляційна залежність. Ці залежності можуть бути представлені у вигляді лінійної функції

-від температури

$$T_x = 189 - 1,7\Delta T_m, \quad (2.4)$$

-від прикладеної напруги

$$T_x = 154 - 0,13\Delta f_m, \quad (2.5)$$

де, T_x - температура холодостійкості Кельвіна. У той же час, щоб визначити необхідно відрізати зразок від кабелю і визначити його значення експериментальним шляхом, тобто цей спосіб не прийнятний в експлуатації.

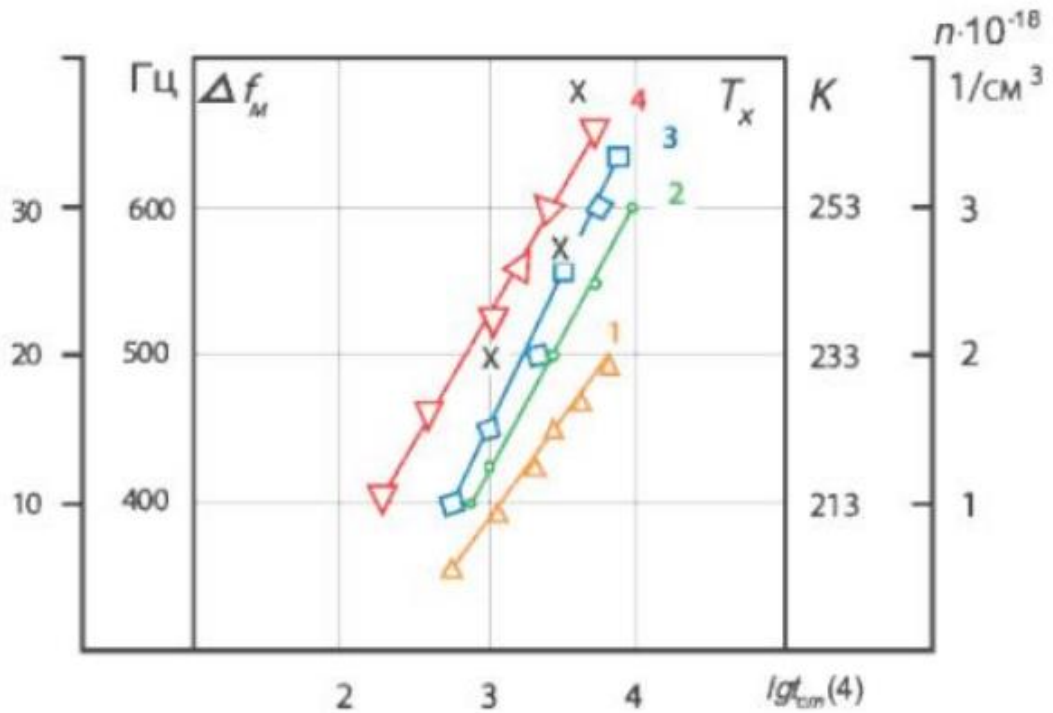


Рисунок 2.4 – Залежності параметрів старіння

При дослідженні температурно-частотних спектрів діелектричних втрат досліди проводяться на ділянках кабелю або кабельних лініях без взяття проб, тобто метод є неруйнівним (випробувальна напруга становить 30-50 В, діапазон частот до 15 кГц, що не може вплинути на ізоляцію в момент тестування). Введено поняття коефіцієнта зміни параметрівПродуктивність під час старіння:

$$K_n = (\Pi_{пр} - \Pi_n) / (\ln_{пр} - \ln_n), \quad (2.6)$$

де, $\Pi_{пр}$ Π_n - відповідне значення параметра: граничне (вичерпаний ресурс) і отримане в ході експерименту;

$t_{пр}$ - межа робочого часу, що відповідає часу роботи;

t_n - накопичений ресурс на момент вимірювання параметра Π_n .

Можна визначити накопичений ресурс

$$\tau_n = \tau_{\text{прф}} \cdot \exp \left[\frac{\Pi_n - \Pi_{\text{пр}}}{K_n} + \frac{W}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_\phi} \right) \right], \quad (2.7)$$

де, $\tau_{\text{прф}}$ - граничне значення терміну служби в режимі примусового випробування;

T_ϕ - температура старіння у форсованому режимі;

T_p - робоча температура кабелю;

W – 54 кДж/моль – умовна енергія активації процесу деструкції ПЕ.

Щоб використовувати формулу (5), потрібно спочатку визначити Критеріями ефективності є ΔT_m і Δf_m . [14] Вимірювання параметрів ΔT_m повинна здійснюватися з рівномірним нагріванням кабелю, який майже неможливо. Більш зручним параметром є Δf_m . Був Розроблено експрес-метод, що дозволяє визначати параметр Δf_m шляхом проведення Вимірювання тільки на двох частотах. Отримано формулу для визначення f_m :

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2 \cdot \left(\frac{f_1^x \cdot \text{tg} \delta_1 - f_2^x \cdot \text{tg} \delta_2}{f_2^x \cdot \text{tg} \delta_2 - f_1^x \cdot \text{tg} \delta_1} \right)^{\frac{1}{x^2}}}, \quad (2.8)$$

де $\lambda = 0,4-0,8$ – параметр розподілу часу релаксації.

Після визначення f_m обчислюється параметр Δf_m .

Математична модель виникнення включень

У кабельних лініях електричних мереж існує різновид неоднорідності у вигляді включень, прошарків між окремими шарами, мікротріщини, відшарування ізоляції і т.д. Через перерозподіл електричне поле через різницю діелектричної проникності ϵ і питома провідність γ , тобто $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2$ або $\gamma_1 \cdot E_1 = \gamma_2 \cdot E_2$ у цих місцях неоднорідності, спостерігається висока локальна напруженість поля. Розвиток розряду в області включення, де спостерігається висока локальна напруженість поля, викликає неповний пробій ізоляції – частковий розряд. З метою виявлення закономірностей розвитку часткових розрядів в газових включеннях, визначити характеристики часткових розрядів, що беруть участь у знищенні ізоляції.

Для визначення величини області включення, процес розвитку ПДн, звідси механізми старіння і електричного пробою, необхідно визначити параметри, а саме встановити зв'язок між напруга виникнення $U_{чр}$, його максимальне значення $q_{чр}$ і товщина включення. Напруженість електричного поля в газовому полі включення перевищує польову міцність ізоляційного матеріалу, так що оскільки його діелектрична проникність значно вища за діелектрик газопроникність ($\epsilon_{газ}=1$). Якщо матеріал утеплювача напруга $U = U_m \sin \omega t$, тоді при включенні газу напруга дорівнюватиме:

$$U_B = U \cdot \frac{C_{п}}{C_B}, \quad (2.9)$$

Прикладена напруга викликає накопичення поверхневого заряду на кордоні між включенням газу і рештою діелектрика. Коли напруга досягне початкової іонізаційної напруги газу при включенні, Здатність до включення часткового розряду:

$$U_{чр} = \frac{U_{в.пр}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{C_{п} + C_B}{C_B}, \quad (2.10)$$

$$\text{де, } C_{п} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{п} \cdot S_B}{h - h_B}, \quad C_B = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{п} \cdot S_B}{h_B}$$

$U_{в.пр}$ – пробивна напруга включення газу;

C_B – газова зона включення.

Після підстановки C_B , $C_{п}$ враховують, що $h_B \ll h$ і неоднорідність ізоляція електричного поля, отримуємо:

$$U_B = \frac{U_{в.пр}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\epsilon_{п}}{\epsilon_0} \cdot \frac{h}{\delta K_n}, \quad (2.11)$$

де, $K_n = E_{max} / E_{PC}$ – коефіцієнт неоднорідності електричного поля в ізоляції дорівнює відношенню максимального напруження E_{max} до середньої напруженості E_{PC} в ізоляційній щілині.[15]

Ізоляційний матеріал має діелектричну товщину вставки h_B , товщину діелектрика h і діелектрична проникність ізоляційного матеріалу $\epsilon_i = \epsilon_r$, де $h_B \ll h$ при робочій напрузі U , напруга комутації:

$$U_B = \epsilon_{п} \cdot \frac{h_B}{h} \cdot U, \quad (2.12)$$

Чим вище напруга, тим вище допустима напруга для ізоляції (тривала робоча напруга). Зростання застосовуваного напруга призводить до лінійного підвищення рівня часткових розрядів, а також до зниження порогу їх виникнення. При певній нарузі $U_{кр}$ - напруга критична, $\eta_{чр}$ – інтенсивність часткових розрядів різко зростає, що призводить до різкого погіршення ізоляції і скорочення терміну служби.

2.4 Висновки до розділу

Провівши дослідження, можна зробити наступні висновки - процесі експлуатації кабельних ліній електропередач з ізоляцією із зшитого поліетилену ізоляція може бути піддана ряду зовнішніх і внутрішніх руйнівних впливів, що призводять до її старіння:

1. Температурний вплив визначає швидкість хімічної реакції руйнування і деполімеризації зшитого поліетилену;
2. Висока вологість навколишнього середовища може спричинити вологість утеплювача і погіршувати його властивості. Для визначення ступеня гідратації визначається коефіцієнт поглинання, і ізоляція просушується. Крім того, вміст вологи в мікропорах ізоляційного матеріалу викликає явище водопробивання, що прискорює розвиток дефектів ізоляції;
3. Ультрафіолетове випромінювання руйнівню впливає на ізоляційну поверхню, так як фотони знаходяться в ультрафіолетовому діапазоні та мають високу енергію і руйнують молекулярну структуру ізоляції (відщеплюючи бічні групи, частіше водень) на його поверхні, призводять до підвищення твердості ізоляції, його висихання, а значить і розтріскування. Таким чином погіршуються теплоізоляційні властивості. Це явище ще називають фотохімічне руйнування.
4. Хімічний вплив виражається в різноманітних хімічних речовинах, які можуть впливати і зруйнувати ізоляцію, Наприклад, азотна кислота, яка здатна

зруйнувати поліетилен при 50% розчину, або наявність кисню з повітря, в результаті чого термічно-окислювальне руйнування;

5. Механічні напруження спричиняють руйнування міжатомних зв'язків під час виникнення механічної напруженості над енергією зв'язків атомів;

6. Вплив випромінювання на діелектрик може призвести до різних пошкодження на молекулярному рівні. Відбувається зміна структури, властивостей, стану ізолятора. Носії заряду, що утворюються в опромінюваних речовин, створюють стаціонарні і перехідні струми і призводять до накопичення об'ємного заряду в діелектриках, який може зберігатися в протягом тривалого часу. Однак розробка системи моніторингу всіх цих факторів є досить складним завданням з огляду на потребу в глибоких вивченнях природи всіх цих впливів на ізоляцію. Крім того, потрібні індивідуальні підходи до моніторингу залишкового життя кабелю, так як вплив певних факторів на ізоляцію може бути незначною, тому нею можна буде нехтувати.

Виходячи з конструкції обраного раніше кабелю, було прийнято рішення не брати до уваги можливі наступні фактори виходу з ладу ізоляційного матеріалу:

1. Вологість навколишнього середовища, так як кабель має водоблокуючі стрічки для запобігання намокання кабелів; Відомо, що поліетилен має відносно низьке вологопоглинання;

2. Ультрафіолетове випромінювання, так як має руйнівну дію впливу виключно на поверхню кабелю, тобто на його оболонку, не пошкоджуючи робочу ізоляцію, розташовану в кабелі, щоб він захищений від впливу зовнішнього сонячного випромінювання;

3. Було прийнято рішення не розглядати хімічний вплив окремо, так як всі хімічні речовини можуть перебувати в структурі ізоляції в невеликих кількостях або утворилися в результаті руйнування ізоляційного матеріалу,

отже, будуть визначатися процесами термічної деструкції, викликані нагріванням струмопровідної жили в робочому режимі кабелю;

4. Механічна напруга виражається в вигинах (при укладанні), стиснення і розтягування кабелів, викликане перепадами температур і зсуву ґрунту (при закладці в ґрунт);

5. Радіоактивне випромінювання впливає на діелектрик тільки на спеціалізованих об'єктах, наприклад, на атомних електростанціях, але ціль дослідження - розробка системи визначення залишкового ресурсу для кабелів загального призначення, що використовуються в промислових цілях.

Таким чином, виходячи з аналізу конструкції кабелів і впливів, яким може піддаватись їх ізоляція, досить врахувати в процесі старіння впливу температури і часткових розрядів, викликаних наявністю електричного поля високої напруженості.

3. РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розробка математичної моделі для прогнозування залишкового терміну служби

Розрахунок залишкового ресурсу проводився на основі існуючої моделі старіння ізоляції в спрощеному вигляді:

$$\tau_{\text{сл}} = AE^{-n} \exp \cdot \frac{W_a}{kT}, \quad (3.1)$$

Згідно з наведеними вище висновками, термін служби ізоляції визначається потужністю часткових розрядів і швидкістю хімічної реакції при термічному і термоокислювальному руйнуванні ізоляційної речовини та визначається законом С. А. Арреніуса.

Представлення формули з урахуванням ймовірності пробією ізоляції:

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)}, \quad (3.4)$$

де, N_t - число молекул речовини в одиниці об'єму в даний момент часу,

N_0 - число молекул речовини в одиниці об'єму до початку

$N_t / N_0 = 0,645$,

B - константа,

E - напруженість електричного поля, n - показник степеня, який залежить від виду і структури матеріалу,

$K_t(T) = K_0 \cdot e(-W_a/kT)$ – коефіцієнт швидкості хімічної реакції при даній температурі в даний момент часу,

K_0 — константа швидкості реакції закону Арреніуса,

W_a - енергія активації,

k — постійна Больцмана,

T — температура в Кельвінах,

c - коефіцієнт, що визначається енергією впливу температури і електричного поля.

При цьому, щоб розрахувати залишковий ресурс, необхідно провести розрахунок кількості незруйнованих молекул матеріалу в даному об'ємі речовини для визначення ступіню його деградації. Кількість незруйнованих молекули в даний момент часу, з постійною напругою і температурою буде розраховуватися за формулою:

$$N_t = N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)}, \quad (3.5)$$

З огляду на умову, що з плином часу інтенсивність електричного поля і температури, як правило, змінюються хаотично в умовах операції, необхідно зробити розрахунок з розбивкою за часом (наприклад, один раз на секунду). Враховуючи, що напруга і температура хаотичні, пропонується зробити розрахунок по формулі

$$N_t(t) = N_0 - \int_0^t v(t) dt, \quad (3.6)$$

де $v(t)$ - функція швидкості руйнування матеріалу під загальним впливом факторів, що руйнують ізоляцію, яка може бути визначено за формулою:

$$v(t) = -\frac{dN}{dt} = c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \cdot N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)}. \quad (3.7)$$

Далі, щоб вирішити проблему прогнозування зносу ізоляції, необхідно екстраполювати функцію $N_t(t)$ з даних, накопичених за певний проміжок часу. З огляду на циклічність процесів, що відбувається в електроенергетичній системі, передбачається, що функція залишиться експоненціальною.

3.1.1 Електричний розрахунок

Підбір номінального перерізу і основних геометричних параметрів кабельної лінії для передачі потужності $P = 250$ МВА при напруги $U = 20$ кВ. Фазний струм при такій потужності і напрузі

$$I_\phi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos\phi} = \frac{250 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,96} = 7,518 \cdot 10^3 \text{ A}, \quad (3.8)$$

Номінальний переріз жили визначається через економічної щільності струму

$$S_H = \frac{P_\phi}{J_e} = \frac{7,518 \cdot 10^3}{3,1} = 2425 \text{ мм}^2, \quad (3.9)$$

де, $J_e = 3,1 \text{ А/мм}^2$ для мідного провідника - економічна густина струму (при тривалості роботи кабелю більше 3000-5000 годин). Згідно ГОСТ 22483-2012 «Струмопровідні мідні та алюмінієві жили кабелів, проводів» максимальний переріз жили – 1000 мм^2 .

Тому, щоб можна було спроектувати кабельну лінію, для передачі заданої потужності, розділимо передаване навантаження на дві паралельні лінії, як показано на рисунку 3.1.

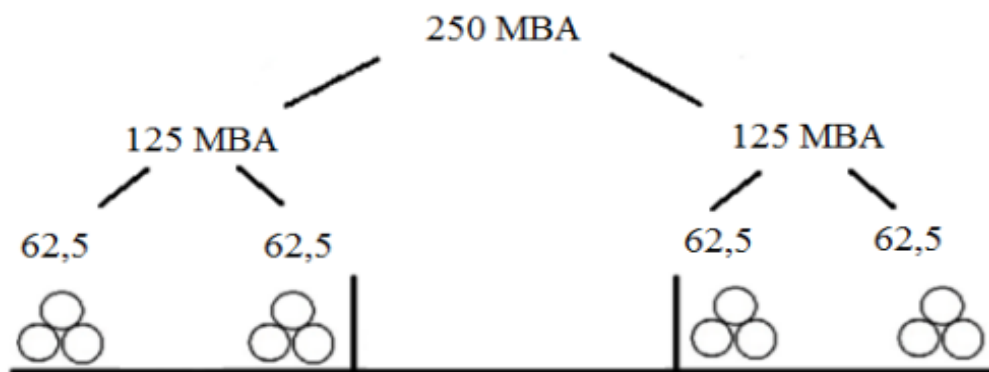


Рисунок 3.1 - Розподіл напруги на два кабелі

Розбиваємо фазу на дві кабельні лінії, в яких буде три кабелі до номінальної потужності 62,5 МВА. Враховуючи балансування навантаження 62,5 МВА для двох фаз перераховуємо фазний струм для одного кабелю.

$$I_{\Phi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos\varphi} = \frac{62,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,96} = 1,879 \cdot 10^3 \text{ А.} \quad (3.10)$$

Номінальний переріз жили

$$S_H = \frac{I_{\Phi}}{J_e} = \frac{1,879 \cdot 10^3}{3,1} = 606,257 \text{ мм}^2. \quad (3.11)$$

Згідно ГОСТ 22483-2012 «Струмопровідні мідні та алюмінієві жили кабелів, проводів» вибираємо номінальний переріз провідника 630 мм^2 перетин екрану підібрано відповідно до ГОСТ 55025-2012

Номінальний поперечний переріз мідного екрана в одножилевих кабелях і трижилевих кабелях з секторними жилами і загальним перетином

мідні екрани, накладені на кожен ізольований круглий провідник в трижильному кабелі, повинні бути не менше 16 мм² для кабелів з жилами номінального перерізу 16-120 мм², не менше 25 мм²- для кабелів з струмопровідними жилами номінального перетину 150-300 мм² і не менше 35 мм²- для кабелів з струмопровідними жилами з номінальним перетином 400 мм² і більше.

Тому вибираємо екран 35 мм².

Таблиця 3.1- Основні технічні характеристики ПвВнг(А)-LS 1х630/35

Вид клітатичного виконання	В
Категорія розміщення	1-5 по ГОСТ 15150
Клас пожежостійкості	ГОСТ 31565-2012:П168.2.2.2.
Номінальна частота ,Гц	50
Діапазон робочих температур	Від -50 до +50 Цельсія
Максимальна допустима температура жили	Тривало до 90 °С, в аварійному режимі 105 °С, в режимі КЗ- 250 °С
Максимальна допустима температура екрану в режимі короткого замикання , до 5 с.	350 °С
Тривалість роботи кабелю в режимах перевантаження ,не більше : (год)	1000(1000)
Монтаж кабелю допускається проводити при температурі не нижче	15°С
Мінімальний радіус згину	15(7,5)

За конструкцією провідник відноситься до 2-го класу гнучкості. Для прийнятого перетину мідних жил по ГОСТ 22483-77 мінімальна кількість окремих проводів в провіднику = 53. Вибираємо систему, нормальну систему скручування (всі дроти однакового діаметру) Скручування з 5 дротами по центру, N = 5 +11+17 +23 =56, що відповідає 5-му скручування з кількістю завитків 4.

Переріз однієї жили

$$S_{\text{пр}} = \frac{S_{\text{н}}}{N} = \frac{630}{56} = 11,25 \text{ мм}^2. \quad (3.12)$$

Діаметр жили

$$D_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{н}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11,25}{3,14}} = 3,785 \text{ мм}. \quad (3.13)$$

Діаметр скрученої жили

$$D_{\text{ж}} = (2n + 0,7)d_{\text{пр}} = (2 \cdot 4 + 0,7) \cdot 3,785 = 32,929 \text{ мм}. \quad (3.14)$$

Коефіцієнт заповнення жили

$$f = \left[\frac{(3n+2)n}{(2n+0,7)^2} \right] = \left[\frac{(3 \cdot 4+2) \cdot 4}{(2 \cdot 4+0,7)^2} \right] = 0,74. \quad (3.15)$$

Приймаємо кратність кроку скрутки по кожному повиву $m_2 = 18$; $m_3 = 16$; $m_4 = 15$

Діаметр кожного повиву

Место для уравнения.

$$D_1 = (2n + 0,7)d_{\text{пр}} = (2 \cdot 1 + 0,7) \cdot 4,265 = 10,22 \text{ мм}^2$$

$$D_2 = (2n + 0,7)d_{\text{пр}} = (2 \cdot 2 + 0,7) \cdot 4,265 = 17,79 \text{ мм}^2$$

$$D_3 = (2n + 0,7)d_{\text{пр}} = (2 \cdot 3 + 0,7) \cdot 4,265 = 25,36 \text{ мм}^2$$

$$D_4 = D_{\text{ж}} = 32,929 \text{ мм}^2, \quad (3.16)$$

Коефіцієнт скрутки кожного повиву

$$k_{y2} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m^2}} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{18^2}} = 1,015$$

$$k_{y3} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{16^2}} = 1,019$$

$$k_{y4} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{15^2}} = 1,022, \quad (3.17)$$

Загальний коефіцієнт скрутки

$$k_{y.об} = \frac{5+11 \cdot 1,015+17 \cdot 1,019+23 \cdot 1,022}{5+11+17+23} = 1,021. \quad (3.18)$$

Припустимо, що коефіцієнт ущільнення (η) дорівнює 0,9 (ущільнення буде виконувати по зовнішньому діаметру). Період ущільненої жили рівний

$$S_y = \frac{S_H}{\eta} = \frac{630}{0,9} = 700 \text{ мм}^2 . \quad (3.19)$$

Діаметр ущільненої жили

$$D_{ж} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_y}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 700}{3,14}} = 29,86 \text{ мм} . \quad (3.20)$$

Згідно ГОСТ 22483-2012 Додаток С «Граничні розміри круглих провідників» мінімальні та максимальні діаметри провідників круглого перерізу багатожильних жили з міді на перетин 630 мм² 28,7-32,5 мм.

Таблиця 3.2 – Діаметри круглих багатопровідникових мідних жил

Номінальний переріз, мм ²	Діаметр круглих мідних жил (клас 2) ,мм	
	Мінімальний	Максимальний
10	3.6	4.0
16	4.6	5.2
25	5.6	6.5
35	6.6	7.5
50	7.7	8.6
70	9.3	10.2
95	11.0	12.0
120	12,3	13,5
150	13,7	15,0
185	15,3	16,8
240	17,3	19,2
300	19,7	21,6
400	22,3	24,6
500	25,3	27,6
625	28,6	32,4
630	28,7	32,5

3.1.2 Вибір товщини екрана провідника

У силових кабелях для вирівнювання напруженості електричного поля використовують екрани. Вони дозволяють краще проводити шунтування пор та інших дефектів на поверхні жил.

Електропровідний екран із зшитого поліетилену на струмопровідному провіднику, згладжує нерівності на його поверхні, сприяючи утворенню радіального електричного поля в товщі ізоляції.

Поверх кожної струмопровідної жили кабеля із зшитого поліетилену повинен являти собою екструдований екран, виготовлений з електропровідного зшитого полімерного композита товщиною $(0,6 \pm 0,3)$ мм. Для круглих провідників номінальним перерізом 300 мм і більше і для кабелів з струмопровідними жилами секторної форми поперечний переріз 95-400 товщина екструдованого електропровідного екрану має становити $(0,9 \pm 0,3)$ мм.

Візьмемо товщину екрану по серцевині, $\Delta e = 1$ мм.

3.1.3 Розрахунок електричної міцності ізоляції кабеля

Товщина ізоляції для кабелів з пластиковою ізоляцією до середньої напруги розраховується виходячи з середньої напруженості електричного поля. Для зшитого поліетилену для $U_{ном} = 20$ кВ середнє значення напруженості електричного поля в ізоляції $E_{cp} = 2,3$ кВ/мм.

Товщина ізоляції по фазній напрузі:

$$U_{p.пер} = \frac{U_{\phi}}{E_{cp}} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 2,3} = 5,02 \text{ мм.} \quad (3.21)$$

Відповідно до вимог ГОСТ 55025-2012 для кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену напругою 20 кВ, беремо значення товщини ізоляції 5,5 мм.

Таблиці 3.3 – Номінальна товщина ізоляції від перерізу жили

Номинальний переріз кабелю, мм ²	Номинальна товщина ізоляції, мм					
	Номинальна напруга кабелю, кВ					
	6	10	15	20	30	35
35-185	2,5	3,4	4,5	5,5	8,0	8,5
240	2,6					
300	2,8					
400	3,0					
500-1600	3,2					

Діаметр екранованої жили

$$D_{\text{еж}} = D_{\text{ж}} + 2 \cdot \Delta_{\text{еж}} = 29,854 + 2 \cdot 1 = 31,854 \text{ мм.} \quad (3.22)$$

Діаметр і радіус по ізоляції

$$R_{\text{із}} = r_{\text{еж}} + \Delta_{\text{із}} = 15,927 + 5,5 = 21,427 \text{ мм}$$

$$D_{\text{із}} = 2 \cdot R_{\text{із}} = 2 \cdot 21,427 = 42,854 \text{ мм.} \quad (3.23)$$

Розрахункове значення максимального напруженості електричного поля

$$E_{\text{max p}} = \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{еж}} \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{із}}}{r_{\text{еж}}}\right)} = \frac{20 \cdot 10^3}{15,927 \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right)} = 4,233 \cdot 10^3 \frac{\text{В}}{\text{мм}}. \quad (3.24)$$

Відповідно до пункту 5.2.2.12 ГОСТ 55025-2012 пробивна напруга на електропровідному екрані поверх струмопровідної жили після електрохімічного старіння кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену у воді повинна бути не менше 23 кВт/мм, а розмір водоміру не більше 500 мкм. Значення пробивного напруження на екрані уздовж провідника кабелів зазначаються в технічних умовах на кабелі конкретних виробників.

Згідно ГОСТ 55025-2012 п. 5.2.19 поверх ізоляції із зшитого поліетилену повинен бути екструдований екран, виготовлений з електропровідного зшитого полімерного компаунда товщиною $(0,6 \pm 0,3 \text{ мм})$. Приймає товщину ізоляційний екран 0,6 мм.

$$\Delta i = 0,6 \text{ мм}$$

Діаметр і радіус ізолюваного провідника з екраном:

$$\begin{aligned} R_{\text{ек}} &= R_{\text{із}} + \Delta_{\text{ек}} = 21,427 + 0,6 = 22,027 \text{ мм} \\ D_{\text{ек}} &= 2 \cdot R = 2 \cdot 22,027 = 44,0054 \text{ мм} . \end{aligned} \quad (3.25)$$

3.1.4 Вибір ізоляції та оболонки кабелю

Поверх електропровідного екрану на ізоляції що виконана із зшитого полімеру одножильних і трижильних кабелів з жилами круглої форми форми, а також поверх жили кабелів з секторними жилами з ізоляцією із зшитого поліетилену повинна бути загорнута шаром не менше 0,2 мм завтовшки стрічкою або смужкою електропровідного паперу, або електропровідної синтетичної стрічки.

$$\Delta_{\text{л.1}} = 0,2 \text{ мм}$$

Діаметр і радіус першого розділового шару

$$\begin{aligned} R_{\text{с1}} &= R_{\text{ек}} + \Delta_{\text{л1}} = 22,027 + 0,2 = 22,227 \text{ мм} \\ D_{\text{с1}} &= 2 \cdot R_{\text{с1}} = 2 \cdot 22,227 = 44,454 \text{ м} . \end{aligned} \quad (3.26)$$

Для того аби оболонка не прилипала до мідного екрану , поверх ленти накладають розділювальний шар з склоленти номінальною товщиною 0,2 мм.

$$\begin{aligned} R_{\text{с2}} &= R_{\text{е}} + \Delta_{\text{вл2}} = 22,727 + 0,2 = 22,927 \text{ мм} \\ D_{\text{с2}} &= 2 \cdot R_{\text{с2}} = 2 \cdot 23,927 = 47,854 \text{ мм} . \end{aligned} \quad (3.27)$$

Внутрішня оболонка - полівінілхлоридний компаунд ГОСТ 55025-2012 пункт 5.2.1.12 приймаємо товщину оболонки 1,8 мм.

$$\begin{aligned} D_{\text{с3}} &= R_{\text{ш2}} + \Delta_{\text{лл}} = 23,927 + 1,8 = 25,727 \text{ мм} \\ R_{\text{с3}} &= 2 \cdot R_{\text{с2}} = 2 \cdot 25,727 = 51,454 \text{ мм} . \end{aligned}$$

(3.28)

Поверх внутрішньої оболонки накладається тепловий бар'єр з двох скляних стрічок номінальною товщиною 0,2 мм .

$$\begin{aligned} R_{\text{с4}} &= R_{\text{ш3}} + 2\Delta_{\text{тер}} = 25,727 + 2 \cdot 0,2 = 26,1127 \text{ мм} \\ D_{\text{с4}} &= 2 \cdot R_{\text{с4}} = 2 \cdot 26,127 = 52,254 \text{ мм} . \end{aligned} \quad (3.29)$$

Останнім етапом є нанесення зовнішньої оболонки полівінілхлоридного компаунда з низькою пожежонебезпекою і низькою токсичністю продуктів при горінні і тлінні.

Номінальна товщина при заданому діаметрі становить 2,9 мм

$$\begin{aligned}R_k &= R_{ш4} + \Delta_{об} = 26,127 + 2,9 = 29,027 \text{ мм} \\D_k &= 2 \cdot R_k = 2 \cdot 29,027 = 58,054 \text{ мм.}\end{aligned}\quad (3.30)$$

За результатами проведених розрахунків можна побачити, що значення діаметра кабелю що знаходиться під зовнішньою оболонкою збігалася зі значеннями по ГОСТу, а саме входила в межі 50-60 мм, для номінальної товщини зовнішньої оболонки 2,9 мм. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що розрахунок був зроблений правильно.

3.2 Тепловий розрахунок

Розрахунок електричних характеристик

Електричні характеристики силових кабелів такі:

- Струмopровідний опір провідника ;
- Опір ізоляції;
- Ізоляційна здатність;

Розрахунок характеристик полягає у визначенні опору провідника, ізоляції і ємності кабелю в діапазоні робочих температур.

3.2.1 Розрахунок опору струмопровідної жили

Основним джерелом тепла є струмовідна жила кабелю.

Знайдемо опір жили кабелю при 15 градусах Цельсія

$$R_{ж0} = \rho_{cu} \cdot \frac{1}{S_H \cdot 10^{-6}} \cdot k_y = 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{630 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,017 = 2,778 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

(3.31)

Відповідно до ГОСТ 22483-2012, пункт 5.2.1, таблиця 4, електромонтажний опір для 630 мм² не повинно перевищувати 0,153 Ом

Опів жили при постійній напрузі та робочій температурі:

$$R_t = R_{ж0} \cdot [1 + \alpha_{cu} \cdot (t_{max} - 20)] =$$

$$= 2,778 \cdot 10^{-5} \cdot [1 + 0,0039 \cdot (90 - 20)] = 3,536 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (3.32)$$

де, α - температурний коефіцієнт міді ;

t_{\max} - довготривала допустима температура (90 °C).

Збільшення опору струмопровідного провідника при змінному струмі у порівнянні зі опором на постійному струму при робочій температурі буде рівною

$$R_T = R_t \cdot (1 + y_{\text{п}} + y_{\text{б}}), \quad (3.33)$$

де, $y_{\text{п}}$, $y_{\text{б}}$ - коефіцієнти, що характеризують збільшення опору жил за рахунок поверхневого ефекту і ефекту близькості. Дані коефіцієнти враховують форму, розмір, конструкцію та розташування кабелів

Тому потім знаходимо опір жили з урахуванням ефекту близькості і поверхневого ефекту.

Для частоти потужності параметр x визначається як:

$$x_n = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{k_n}{R_{\text{ж0}}}} = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{1}{2,778 \cdot 10^{-5}}} = 2,133, \quad (3.34)$$

k - коефіцієнт, що залежить від будови провідника, а для круглого багатожильний провідник дорівнює 1.

Поверхневий ефект (зміщення напруженості поля жили кабелю за рахунок електромагнітного поля фази) ґрунтується на формулі і:

$$y_n = \frac{x_n^4}{192 + 0,8 \cdot x_n^4} = \frac{2,12^4}{192 + 0,8 \cdot 2,12^4} = 0,182. \quad (3.35)$$

Ефект близькості (вплив електромагнітного поля фаз кабелю один на одного) ґрунтується на співвідношенні:

$$y_n \rightarrow y_n^1 \rightarrow x \rightarrow k$$

Щоб розташувати одножильний кабель трикутником, коефіцієнт близькості буде виглядати так:

$$\begin{aligned} y_{\text{б}} &= y_n \cdot \left(\frac{D_{\text{еж}}}{\alpha}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{D_{\text{еж}}}{\alpha}\right)^2 + \frac{1,18}{0,27}\right] = \\ &= 0,182 \cdot \left(\frac{35,63}{101,442}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{35,63}{101,442}\right)^2 + \frac{1,18}{y_{n2+0,27}}\right] = 0,052, \end{aligned} \quad (3.36)$$

де α - відстань між центрами жил.

Опір провідника при заданому коефіцієнті близькості і поверхневому ефекті дорівнюватиме:

$$R_T = R_t \cdot (1 + y_n + y_\sigma) = 3,536 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 0,182 + 0,052) = 4,289 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (3.37)$$

3.2.2 Розрахунок робочої ємності

Електрична ємність ізоляції також є важливою характеристикою ізоляції. Залежить від геометричних розмірів кабелю, кількості та форми кабелю струмопровідних жил. Величина робочої ємності пов'язана з однорідністю ізоляції, стабільності його радіальних розмірів по периметру і довжині, а в період експлуатації залежить від інтенсивності процесів старіння. Для великої кількості кабелів ємність - це стабільність технологічних процесів.

Ємність електричної ізоляції для одножильного кабелю з однорідною ізоляцією:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln\left(\frac{R_{i3}}{r_{ж}}\right)} = \frac{2,5 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right)} = 4,682 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot \text{м}, \quad (3.38)$$

де $\varepsilon = 2.5$ діелектрична проникність зшитого поліетилену

3.3 Розрахунок залишкового ресурсу при заданих умовах експлуатації

Для початку потрібно перетворити формули, виведені в розробки моделі з метою підстановки заданих в них змінних умов експлуатації. З огляду на експоненціальний характер може бути представлена у вигляді:

$$N = N_0 e^{b \cdot t}, \quad (3.39)$$

де, b - параметр експоненціальної емпіричної залежності.

Визначення параметрів функції виробляється методом найменших квадратів, сутність функції яка полягає в тому, щоб мінімізувати обчислені значення зі значень емпіричного ряду. Задача знаходження параметрів функції

зводиться до системи рівнянь лінійної апроксимації. Для цього беремо рівняння логарифмічне,

$$\ln N = \ln N_0 + bt. \quad (3.40)$$

Потім проводиться заміна

$$N' = \ln N. \quad (3.41)$$

Тоді рівняння можна представити у вигляді

$$N' = \ln N_0 + bt. \quad (3.42)$$

Виходячи з отриманого рівняння і за методом найменших квадратів, знаходження параметра b зводиться до розв'язання рівняння

$$b \cdot \sum_{i=1}^n t_i + n \ln N_0 = \sum_{i=1}^n N'_i, \quad (3.43)$$

де, n - число емпіричних значень.

Знайшовши параметр необхідно розрахувати час до виходу з ладу ізоляції і час до її повного зношування. В одній з моделей, проаналізованих в теоретичній частині було встановлено, що ізоляція буде працювати без збоїв при порушенні до 35,5%, тому відношення $Nt / N_0 = 0,645$. Тоді отримаємо, що обчислений час безвідмовної роботи ізоляції складе:

$$\tau_{бр} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0,645}{b} = \frac{0,4385}{-b}. \quad (3.44)$$

З відомим передбачуваним часом безвідмовної роботи ізоляції та часом операцій, залишок часу безвідмовної роботи можна обчислити за формулою:

$$\tau_{залбр} = \tau_{сл} - \tau_{експ}. \quad (3.45)$$

Щоб розрахувати час до повного зносу ізоляції, потрібно розрахувати час до тих пір, поки не зруйнується 78% матеріалу, отже, буде проводитися розрахунок виходячи з умови $Nt / N_0 = 0,22$:

$$\tau_{сл} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1,514}{-b}. \quad (3.46)$$

Необхідно надати дані про температуру і напругу з урахуванням добової динаміки зміни споживання електроенергії щоб показати приклад того, як працює математична модель і прогнозують знос ізоляції. Дані про температуру та напругу кабелю для прогнозування залишкового терміну служби.

Таблиця 3.4 – Дані про температуру і напругу для прогнозування залишкового ресурсу кабеля.

t, год	T,С	U,кВ
1	85	10,05
2	85	10,1
3	90	10,1
4	95	10,5
5	97	10,15
6	98	10,15
7	102	10,15
8	93	10,1
9	90	10,1
10	85	10
11	90	9,95
12	91	9,9
13	95	9,9
14	102	9,85
15	90	9,8
16	100	9,8
17	93	9,85
18	90	9,9
19	95	10
20	92	10
21	93	10
22	91	9,9
23	90	10
24	90	10

Графічне представлення температури і напруги для прогнозування залишкового ресурсу кабелю показано на рисунках 3.2 та 3.3.

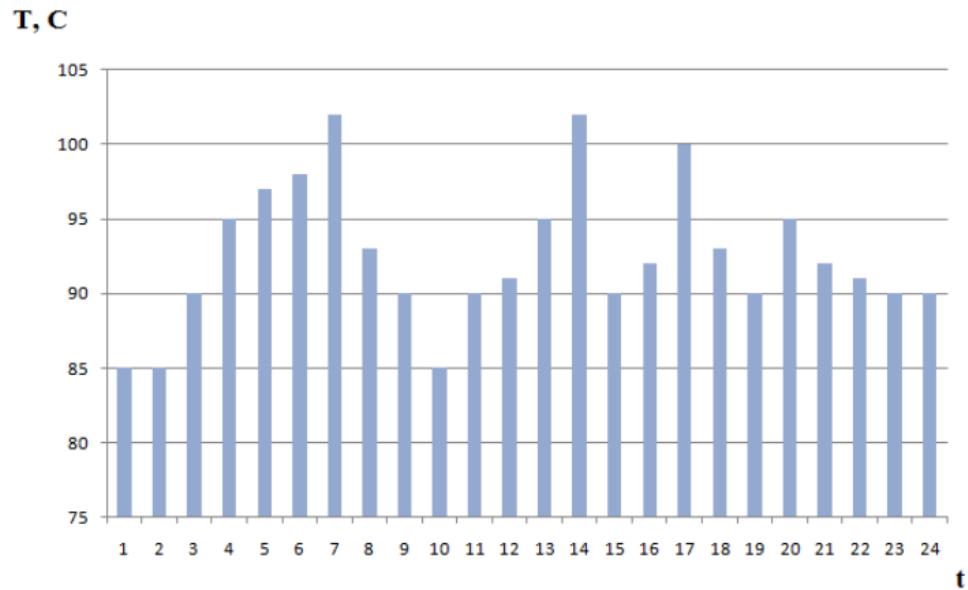


Рисунок 3.2 - Графік температури нагріву провідника від часу роботи

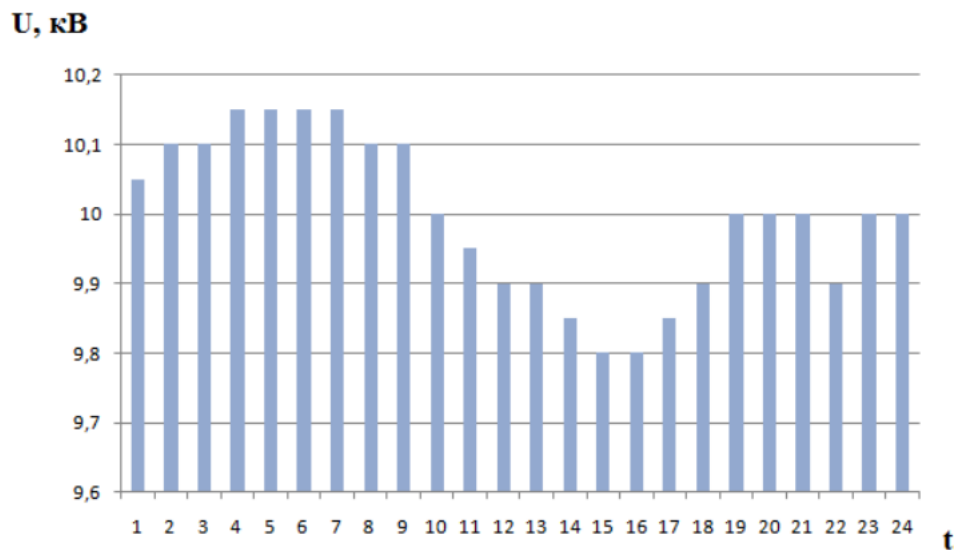


Рисунок 3.3 - Графік напруги ізоляції кабелю

Щоб розрахувати залишковий термін служби, потрібно знати всі параметри моделі старіння ізоляції для визначення швидкості руйнування матеріалу. Константу швидкості реакції можна визначити за графіком Арреніуса для процесу термічної деградації поліетилену (рис. 3.4):

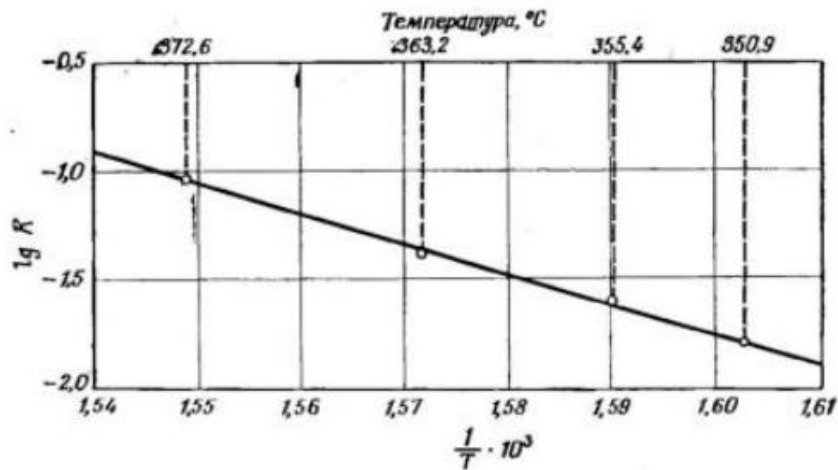


Рисунок 3.4 - Графік Арреніуса для процесу термічного руйнування поліетилену

Для визначення залежності постійної швидкості реакції від температури, потрібно знати рівняння прямої, зображеної на рисунку вище. Для цього потрібно знати координати двох точок, через які проходить пряма лінія. Припустимо, що пряма проходить через точки з координатами (0,001548;-1,05) та (0,00159;-1,7). За рівнянням прямої, що проходить через дві точки отримуємо:

$$\frac{\frac{1}{T}-0,001548}{0,00159-0,001548} = \frac{\log K_t(T)+1,05}{-1,7+1,05}. \quad (3.47)$$

Звідси отримуємо

$$\log K_t(T) = \frac{1}{T} + 22,9, \quad (3.48)$$

де, T - температура в Кельвінах.

Однак постійна швидкості реакції виражається в експоненціальній формі, тому формулу треба перетворити:

Звідси

$$\ln K_t(T) = -\frac{1}{T} + 9,945, \quad (3.49)$$

або

$$K_t(T) = 20854 \cdot e^{-\frac{1}{T}}. \quad (3.50)$$

Також необхідно визначити параметри формули потужності часткових розрядів

$$P_{\text{чр}} = B \cdot U^n. \quad (3.51)$$

Параметри формули були визначені на підставі електричного розрахунку. Значення параметрів змінювалися в процесі старіння, але в моделі пропонується брати середні значення: $B = 5,536 \cdot 10^{-3}$ $n = 5$. Параметр c , що визначає синергію впливу теплових і електричних полів приймається рівним 0,01. N_0 приймається рівним числу Авогадро. Підставляючи отримані параметри в формулу швидкості руйнування

Отримуємо:

$$v(t) = 0,01 \cdot 5,536 \cdot 10^{-3} \cdot U^5 \cdot 20854 e^{\frac{1}{T}} \cdot 6,022 \cdot 10^2 \cdot e^{-0,02 \cdot 5,536 \cdot 10^{-3} \cdot E^5 \cdot 20854 e^{\frac{1}{T}}}. \quad (3.52)$$

Функція зміни числа нерозірваних молекул матеріалу для отриманої емпіричної функції було обрано експоненціальну обчислювальну функцію з програмного комплексу Matlab (рис. 3.5).

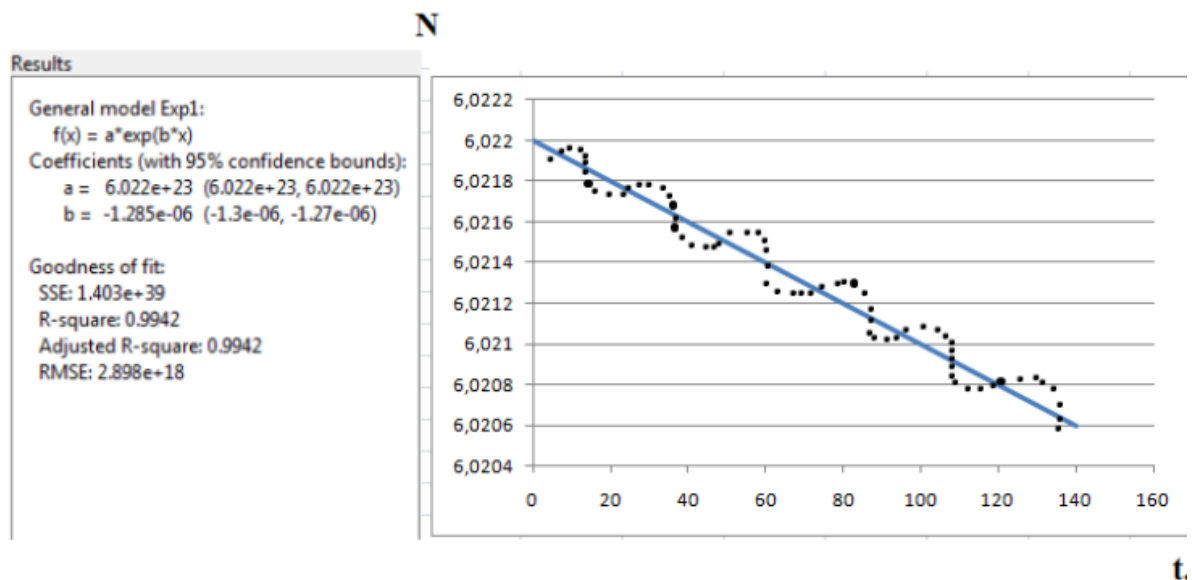


Рисунок 3.5 - Графік зміни числа незруйнованих молекул матеріалу в процесі експлуатації

Час безвідмовної роботи ізоляції становить:

$$\tau_{\text{бр}} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{0,4385}{0,00000263} = 166730 = 19 \text{ років.} \quad (3.53)$$

Термін служби ізоляції до її повного зносу становить:

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1,514}{0,0000059} = 302220 = 34,5 \text{ років.} \quad (3.54)$$

Залишковий ресурс

$$\tau_{\text{зал}} = \tau_{\text{сл}} - \tau_{\text{екс.}} \quad (3.55)$$

$$302220 - 168 = 302054 = 34,4 \text{ роки}$$

3.4 Оцінки похибки

Відносна похибка при розрахунку прогнозованого терміну служби ізоляція визначається за формулою:

$$\varepsilon_{\tau_{\text{сл}}} = \frac{\Delta \tau_{\text{сл}}}{\tau_{\text{зал}}} \cdot 100\% = \frac{2,752}{34,4} \cdot 100\% = 8\%. \quad (3.56)$$

Похибка повинна бути визначена в області робочих значень вимірюваних величин, якими є напруга, струми в жилі і екрані і температура поверхні кабелю (рис. 3.5).

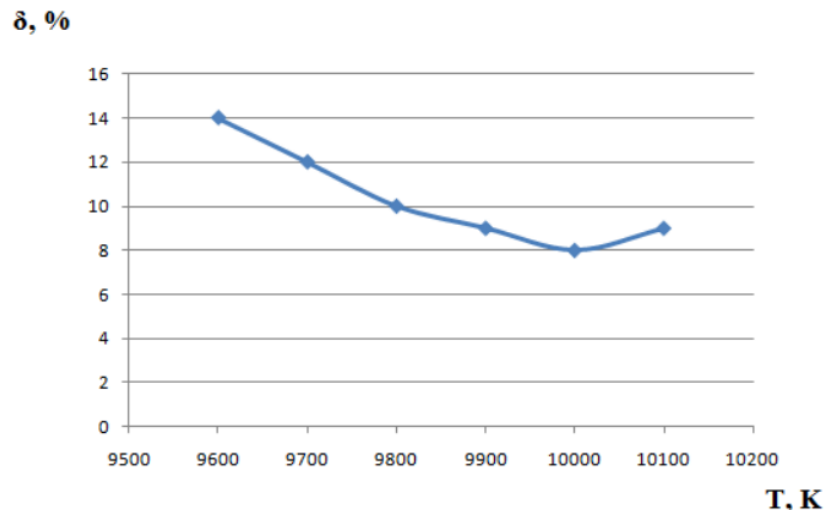


Рисунок 3.5 - Відносна похибка проти напруги

На основі отриманих результатів розрахунків, за допомогою розробленого прикладу і математичної моделі. Рекомендується оцінювати термін служби кабелів, що використовуються в помірному і холодного клімату

і закладаються в ґрунт. У цьому випадку передбачувана похибка при розрахунку терміну служби ізоляції буде на порядок 8%, (рис. 3.6).

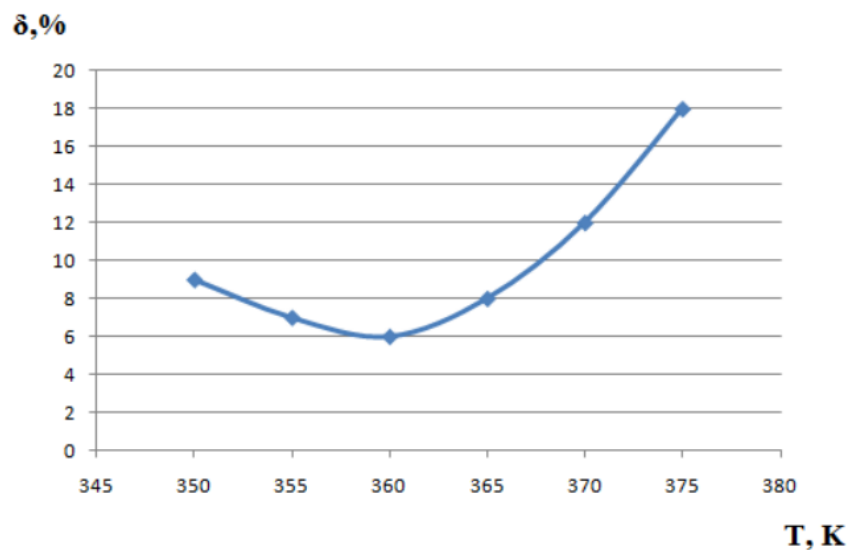


Рисунок 3.6 - Відносна похибка в порівнянні з температурою поверхні кабелю

3.5. Висновки до розділу

Розроблено математичну модель розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю, використання якого дасть можливість спрогнозувати старіння ізоляції;

Аналіз конструкції кабелю показав, що для розрахунку терміну служби ізоляції досить враховувати вплив температури і електричного поля на ізоляцію. Цей приклад показує можливість використання математичної моделі у пристрої контролю залишкового ресурсу ізоляції. Аналіз відомих математичних моделей старіння ізоляції показав подібний характер зміни терміну служби в залежності від впливів. Як еталонна математична модель, вважають модель яка ґрунтується на енергетичних впливах на ізоляцію.

Розроблено математичну модель для розрахунку залишкового терміну служби ізоляції кабелю дозволяє прогнозувати старіння ізоляції і необхідність її заміни, коригувань, зроблених після огляду та результатів експериментальних досліджень. Важлива перевага моделі полягає в її

доцільності в контролю залишкового ресурсу ізоляції. Результати експериментальних досліджень вимагали коригування математичної моделі для визначення залишкового ресурсу ізоляції, так як була виявлена невідповідність між результатами розрахунку і тим, що математична модель не враховує фактори, що руйнують ізоляцію, крім напруги і температури. Для коригування моделі, введена відносна похибка з урахуванням впливу інших факторів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Загальні вимоги електробезпеки при прокладанні кабельних ліній

При виконанні магістерської роботи на тему " Прогнозування ресурсу силових кабелів із зшитого поліетилену керуються Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), а також Правилами безпечної експлуатації електроустановок. Згідно цих правил до прокладання кабельних ліній застосовуються наступні вимоги :

- силові кабельні лінії монтуються таким чином, щоб у процесі монтажу та експлуатації унеможливити виникнення в них небезпечних механічних напружень і пошкоджень, для цього кабелі укладаються з запасом по довжині на 1%-2% для компенсації можливих зсувів ґрунту та температурних деформацій зсувів ґрунту та температурних деформацій самих кабелів і конструкцій, по яких їх прокладено; у траншеях і на поверхах усередині будівель запас створюють укладанням кабелю «змійкою», а по кабельних конструкціях – провисанням у прогонах між конструкціями; укладати запас кабелю у вигляді кілець (витків) заборонено;

- кабелі, що прокладені горизонтально по конструкціях, стінах, перекриттях жорстко закріплюються в кінцевих точках з обох боків у місцях згинання і безпосередньо біля муфт будь-якого типу; одножильні кабелі необхідно закріплювати по всій довжині немагнітними хомутами, які мають силу розриву, вищу від розрахованої сили між двома кабелями під час короткого замикання (додаток А, А.6 ПУЕ);

- кабелі, прокладені вертикально по конструкціях і стінах, треба закріплюються таким чином, щоб унеможливити деформацію оболонок і не порушувати з'єднання жил у муфтах під дією власної ваги кабелів;

- конструкції, на яких укладають неброньовані кабелі, виконуються таким чином, щоб унеможливити механічне пошкодження оболонок кабелів, у тому числі від вібрації (на мостах, естакадах); у місцях жорсткого кріплення

оболонки цих кабелів захищаються від механічних пошкоджень і корозіїз використанням еластичних прокладок;

- металеві конструкції, які підтримують кабелі в разі їх розташування просто неба - оцинковуються;

- кабелі (у тому числі броньовані) в місцях, де є механічні пошкодження (рух автотранспорту, механізмів і вантажів, доступ для сторонніх осіб), захищаються по висоті на 2 м для кабелів напругою до 10 кВ, 3 м – для кабелів напругою 35 кВ та вище від рівня підлоги або землі та на 0,3 м у землі (2.3.99 ПУЕ);

- у разі прокладання кабелів поряд з іншими кабелями, які знаходяться в експлуатації, вживаються заходи для попередження пошкодження останніх. Не дозволено експлуатацію кабелів, які мають пошкоджену ізоляцію кабелю чи струмопровідного екрана або ізоляцію, яка втратила в процесі експлуатації захисні властивості;

- під час прокладання кабельних ліній уникається перетину їх між собою. За необхідності перетину з кабельними лініями, що є прокладеними у ґрунті, керуються вимогами (п. 2.3.69 ПУЕ), а в інших випадках у місцях перетину використовуються багаторівневі лотки або кабелі розділяються перегородками для кабельних ліній, що є виконані з негорючих матеріалів для запобігання пошкодженню електричною дугою кабелів різних кабельних ліній у разі виникнення короткого замикання (КЗ) на одному з кабелів.

- кабельні мережі напругою до 35 кВ обладнуються селективним захистом від однофазного замикання на землю (ОЗЗ), що діє на вимикання, крім випадків, пов'язаних з порушеннями важливих технологічних процесів. В електричних мережах з номінальною напругою 6 кВ, 10 кВ, 15,75 кВ і 27 кВ у разі, якщо захист від ОЗЗ діє тільки на сигнал, а час перебування кабельної лінії в режимі однофазного замикання на землю може становити понад 8 год (до усунення пошкодження), застосовується підвищений клас ізоляції кабелю,

а саме: 10 кВ – у мережі 6 кВ; 15 кВ – у мережі 10 кВ; 20 кВ – у мережі 15,75 кВ; 35 кВ – у мережі 27 кВ (ПКЕ).

Кабельні споруди та конструкції, на які укладають кабелі, треба виконувати з негорючих матеріалів відповідно до класифікації за ДСТУ Б В.2.7-19-95 (ГОСТ 30244- 94) «Будівельні матеріали. Методи випробувань на горючість». У кабельних спорудах заборонено встановлювати будь-які тимчасові пристрої, а також зберігати в них матеріали та устаткування. Тимчасові кабелі необхідно прокладати з дотриманням усіх вимог, які поширюються на кабельні прокладання з дозволу експлуатаційної організації.

4.2 Захист персоналу при експлуатації та обслуговуванні кабельних ліній

В магістерській роботі розглянуто кабель з ізоляцією із зшитого поліетилену. В процесі експлуатації можливі пошкодження ізоляції кабелю. Після ремонту згідно Правил безпечної експлуатації електроустановок (ПБЕЕ) проводиться випробування кабелю. А саме:

- вимірювання опору ізоляції. Опір ізоляції вимірюють мегаомметром на напругу 2,5 кВ протягом 1 хв до і після випробування кабелю підвищеною напругою. Згідно ПБЕЕ вимірювання опору має дозвіл проводити одноосібно особа з другою групою з електробезпеки;
- випробування підвищеною напругою. Значення та параметри випробної напруги і тривалість випробування приймається згідно табл.1.8.39 ПУЕ;
- випробування кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену випрямленою напругою призводить до погіршення стану ізоляції внаслідок накопичення об'ємних зарядів по товщині ізоляції і на поверхні напівпровідникових шарів. Тому КЛ з ізоляцією із зшитого поліетилену випробовують змінною напругою наднизької частоти 0,1 Гц або напругою промислової частоти, значення якої дорівнює номінальній лінійній напрузі мережі, прикладеній між жилою кабелю і мідним екраном. Для кабелю 20 кВ,

що був вибраний в магістерській роботі значення складать - при частоті промисловій значення випробної напруги - 20 кВ на час 5 хв, при частоті 0.1 Гц - 36 кВ на час 30 хв. Під час проведення випробувань випрямленою напругою, періодично і на останній хвилині випробування, спостерігають за показами міліамперметра, тим самим визначають струм витоку. Якщо під час випробування струм витоку наростає або з'являються поштовхи струму, то тривалість випробування збільшують у два рази. Абсолютне значення струму витоку не являється бракувальним показником. У разі випробувань КЛ змінною напругою наднизької частоти 0,1 Гц або напругою промислової частоти результати випробувань вважають задовільними, якщо під час прикладення напруги не відбувся пробій ізоляції кабелю .

Під час таких робіт керівник робіт повинен бути з четвертою групою з електробезпеки. Член бригади що проводить дослід повинен бути одягнений в індивідуальні засоби захисту - діелектричні боти, діелектричні рукавиці, спеціальний одяг та повинен стояти на ізолювальному килимку(згідно ПБЕЕ).

4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики під час воєнного стану

Наслідком масивних ракетних атак рф на енергетичну інфраструктуру України на початку весни і, особливо, у жовтні-листопаді 2022 року виявилась вразливість централізованої організації енергозабезпечення громад .Особливої критичності набула вразливість централізованих систем тепло- і електрогенерування і транспортування у міському середовищі, де відсутні альтернативні джерела генерації і доставки тепло- і електроенергії до окремих осель багатоквартирної і, особливо, високоповерхової забудови .У такій ситуації жителі України і їхні друзі по всьому світові відреагували масовим імпортом електрогенераторів (ЕГ) на двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електрзарядних станцій (ЕЗС). Згодом місцева влада ввела в дію фінансові заходи з метою компенсації частини вартості енергогенеруючих установок

.Такі заходи частково вирішили проблеми громадських закладів, переважно розташованих на нижніх поверхах. Але експлуатувати ЕГ на базі ДВЗ в помешканні не представлялося можливим внаслідок високих рівнів шкідливих викидів і шуму.ЕЗС були придатні до часткового вирішення проблеми електрозабезпечення і використовувались переважно для підтримки мобільного зв'язку, освітлення та інших малопотужних електронних пристроїв. Про обігрів осель з допомогою ЕЗС взагалі не йшлося через недостатню (низьку) щільність акумульованої енергії (Дж) на одиницю маси установки (кг) і значно вищу вартість цієї одиниці (Дж/кг) від ЕЗС.Сонячні панелі також не були в стані виправити дефіцит енергозабезпечення домогосподарства через недостатню потужність, відносно високу ціну і меншу кількість сонячного світла в осінньо-зимовий період. Про вітрову енергію в умовах великого міста годі й казати.Повернення до старого перевіреного методу опалення осель біопаливом, або попросту кажучи — дровами, було можливо лише в умовах приватного будинку за наявності справного димаря. Для більшості ж жителів великого міста, які проживають в багатоквартирних висотних будинках, ця опція взагалі не прийнятна ані з технічної, ані з безпекової точок зору.

Деякі жителі частково намагались вирішувати проблему обігріву оселі користуючись відкритим полум'ям газових плит у разі наявності централізованого газопостачання. Але цей спосіб малоефективний та ще й небезпечний. До того ж у великих містах є багато житлових висотних будинків без централізованого газопостачання, де натомість використовуються кухонні електроплити.Тобто ситуація об'єктивно була і залишається поганою. Попри певне відновлення централізованої енергосистеми після зниження уражень об'єктів енергетичної інфраструктури станом на середину 2023 року завдяки значному посиленню системи ППО і ПРО України, жодної 100% гарантії захисту цих об'єктів, допоки триває російська агресія, ніхто надати не в змозі.

Достатньо згадати в цьому контексті зупин Запорізької АЕС і підрич Каховської ГЕС разом із дамбою водосховища російським агресором.

Отже, узагальнюємо проблему, формулюючи водночас завдання для її вирішення: яким чином / методами / рішеннями посилити стійкість енергозабезпечення населення у вкрай несприятливих надзвичайних умовах, якими є війна? Коли стандартні методи не працюють, настає час звернутися до нестандартних інноваційних рішень. Напряч пошуку рішення — автономізація енергозабезпечення на різних рівнях, починаючи з особи, оселі, домогосподарства і так далі. Розпочнімо з водневих електрогенераторів на базі паливних елементів (ПЕ) . Розмаїття рішень вражає. Але є одне з ключових обмежень — це логістика чистого водню. Водень можна зберігати в газоподібному, рідкому та твердому станах, і кожен метод має свою унікальну перевагу. Незважаючи на те, що поводження зі стисненим і зрідженим воднем є зрілими технологіями, для промислового застосування потрібні відповідні заходи для вирішення проблем високого тиску — приблизно до 100 МПа або низької температури — біля 20°К. Навіть в умовах мирної Європи — це поки що важко підйомна проблема. Про Україну в умовах воєнного стану — годі й казати. Є інші рішення — водень у твердій фазі у складі хімічної сполуки, зокрема, гідриди металів або вуглеводні сполуки включно зі зрідженими газами.

Питання вибору залежатиме від зрілості і доступності технології. Мій конкретний вибір припав на технологію, що точно є поширеною на побутовому рівні. Це використання побутового газу, наприклад, пропану в балонах. Ця технологія зберігання і використання широко доступна від пластикових балончиків для заправки газових запальничок до побутових 10, 20, 50 і більше літрових побутових балонів, що використовуються в приватних домогосподарствах переважно для приготування їжі. В результаті пошуку мені вдалося знайти виробника ЕГ на ПЕ, який здійснив важливий крок — адаптував ЕГ на ПЕ під використання пропану. Тут назва виробника опущена,

щоб стаття не виглядала як рекламне просування. Пропан на вході ЕГ перетворюється на водень і двоокис вуглецю внаслідок відомої в індустрії процедури парової конверсії або, так званого, риформінгу, що застосовується для промислового вироблення водню:

Які достоїнства має подібна установка ЕГ на ПЕ:

- її можна ставити у приміщенні (вдома) — вона компактна (власне ЕГ на 1.25 кВт має розмір 20х30х40 см і вагу біля 9 кг); не шумить — відсутні рухомі частини; викиди — CO₂;
- попутно видає тепло — це ідеальне рішення взимку; фактично такий ЕГ є теплоелектростанцією (ТЕС);
- не потребує обслуговування — приміром від побутового 20 л балону з пропаном установка на 1.25 кВт працюватиме без зупину і догляду 3.5 доби.

Що важливо, технологія вже доведена до серійного виробництва. Тобто це вже готове рішення.

Обмежуючі фактори та додаткові вимоги:

- Зрозуміло, кожна медаль має дві сторони. Отже, які про які недоліки, обмеження і вимоги може йти мова:
 - Установка ЕГ на ПЕ потребує тривалого запуску — 10–20 хвилин і додаткової стартової енергії через потребу довести паливний елемент і реакторний відсік для риформінгу до робочої температури 500–600°C.
 - Установка в існуючому вигляді не призначена для утилізації тепла, тому потребує додаткового теплообмінного модуля.
 - Процедура риформінга не на 100% ефективна і, як наслідок, у викидах присутній СО. Тому використання всередині приміщення вимагатиме певних заходів з відведення викидів назовні.
 - Висока ціна — зараз обладнання випускається виробником малою серією для спеціальних жорстких умов експлуатації. Щоб завести це обладнання, скажімо, на український ринок потрібно його кардинально

здешевити, зокрема, шляхом організації виробництва великої серії, оптимізації конструкції, здешевлення комплектуючих тощо.

- Для багатьох застосувань має сенс використовувати ЕГ на ПЕ у сполученні з ЕЗС.

Розглянутий тут варіант ТЕС призначений для забезпечення стійкості та автономності енергозабезпечення (тепла і електрики) на різних масштабах, починаючи з особи, оселі, домогосподарства і так далі для вкрай суворих умов експлуатації. Обладнання просте в установленні і обслуговуванні, в якості палива використовує широко доступний пропан або побутовий газ, що мають розвинену логістику доставки або трубопроводами або балонами різної місткості.

Безумовно подібне обладнання також представляє практичний інтерес для спеціальних застосувань (військові, дослідницькі експедиції, інше), де вимогою є високонадійне компактне автономне тепло- і електрозабезпечення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі приведені результати теоретичних досліджень по прогнозуванні ресурсу силових кабелів із зшитого поліетилену. На базі отриманих результатів зроблено наступні висновки:

1. Показано, що основними чинниками, що впливають на термін служби кабелю є; температура, вологість, ультрафіолетове випромінювання, хімічні речовини що руйнують ізоляцію, механічні пошкодження, які можуть бути як при процесі неякісного монтажу, так і в процесі експлуатації. Вибір матеріалу екрану залежить від того, чи є поле яке впливає на кабельний виріб електрично або магнітного типу.
2. Розроблена математична модель для розрахунку залишкового терміну служби ізоляції кабелю дозволяє прогнозувати старіння ізоляції і необхідність її заміни. Визначено, що термін служби ізоляції визначається потужністю часткових розрядів і швидкістю хімічної реакції при термічному і термоокислювальному руйнуванні.
3. Для кабелю марки ПвВнг(А)-LS 1x630/35 проведено розрахунок електричної міцності ізоляції, розрахункове значення максимального напруженості електричного поля становить $4.233 \cdot 10^3$ В/мм.
4. Тепловий розрахунок кабелю показав, що в діапазоні робочих температур опір струмопровідної жили становить $4.289 \cdot 10^{-5}$ Ом, а ємність електричної ізоляції $4.628 \cdot 10^{-10}$ Ф·м. Залишковий ресурс експлуатації 34.4 роки.
5. За результатами експериментальних досліджень показано що, відносна похибка при розрахунку прогнозованого терміну служби ізоляція в області робочих значень вимірюваних величин, становить 8%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сабарно, Л. Р. Дослідження впливу експлуатаційних та метеорологічних факторів на рівень ушкоджуваності та стан ізоляції розподільних мереж. 2016.
2. А. М. Губіцький, М. С. Наконечний. Методи діагностики стану кабельних ліній з ізоляцією із ршитого поліетилену, 1. Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6–7 груд. 2023.)– Тернопіль: ТНТУ, 2023. – С. 249
3. Розрахунок допустимих навантажень на кабелі з шитого поліетилену / Э. Т. Ларина [и др.] // Електротехніка. – 1991. – № 3. – С. 28–31.
64 Тадмор З., Гогос К. Теоретичні основи полімерів – М.: Хімія, 1984. – 632 с.
4. Camerlingh Onnes H. Expression of the equation of state of gases and liquids by means of series // Comm. Leiden. — 1901. — No 71. — P. 1 – 25.
5. Mayer J.E. The statistical mechanics of condensed systems// J.Chem. Phys. – 1937. – V.5. – No.1. – P. 67-74.
6. Neher J.H., McGrath M.H. The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems // AIEE Transactions – Power Apparatus and System. Part III. 1957. V. 76. P. 752–772.
7. George J. Anders. Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications// IEEE Press power engineering series. –1997 P. 428.
8. Electric Cables – Calculation of the current rating – Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – Section 1: General. IEC Standard 287– 1– 1 (1994– 12).
9. Electric Cables – Calculation of the current rating – Part 2: Thermal resistance – Section 1: Calculation of the thermal resistance. IEC Standard 287–2–1 (1994–12).

10. Electric Cables –Calculation of the current rating – Part 3: Section on operating conditions –Section 1: Reference operating conditions and selection of cable type. IEC Standard 287–3–1 (1995–07).
11. Vollaro Roberto de Lieto, Fontana Lucia, Vallati Andrea. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // Applied Thermal Engineering. 2011. V. 31. P. 772–778.
12. Lyall J.S., Nourbakhsh G., Zhao H.C., Underground power cable environment on line monitoring and analysis // Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting. – Washington. 2000. P. 457–462.
13. Tai-Tien Electric Co., LTD., XLPE Power Cable // Handbook. – 2017. P. 95
14. Правила улаштування електроустановок: [арх. 15 березня 2020] / Міненерговугілля України. — Київ : [б. в.], 2017. — 617 с.
15. Izadi M., Razavi F. Energy Loss Reduction in a 20-kV Distribution Network Considering Available Budget //Journal of Applied Science and Engineering. – 2017. – Т. 20. – №. 1. – С. 21-30

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра електричної інженерії
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) _____
(прізвище та ініціали)
« » 20__ р.

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Губіцькому Антону Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Прогнозування ресурсу силових кабелів зі зшитого поліетилену

Керівник роботи Наконечний Мирослав Степанович, к.т.н.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «10» листопада 2023 року № 4/7-1040

2. Термін подання студентом завершеної роботи грудень 2023 року

3. Вихідні дані до роботи Фізичні процеси в кабелях із зшитого поліетилену

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1 Аналітичний розділ

2 Проектно-конструкторський розділ

3 Розрахунково-дослідницький розділ

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

РЕФЕРАТ

Губіцький А. Прогнозування ресурсу силових кабелів із зшитого поліетилену.141-Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка; Тернопільський національний університет імені Івана Пулюя. Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії. Кафедра електричної інженерії, група ЕТм-61. – Тернопіль : ТНТУ, 2023

Сторінок – 64, рисунків – 13; таблиць – 5; джерел – 15.

У дипломній роботі систематизовано інформацію з даної теми. Ця тема актуальна в сучасному світі, тому що в даний час перед електроенергетикою поставлено завдання масової цифровізації. Аналіз даних, отриманих за допомогою поточної моделі прогнозування залишкових ресурсів, стає можливим у режимі реального часу для з'ясування стану ізоляції в кабельному виробі, в результаті чого прийняти рішення про подальшу експлуатацію кабелю, або відправка його на планове технічне обслуговування. Ключові слова: кабель, струмове навантаження, математична модель, прогнозування, температура.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Основні конструктивні елементи кабелів із зшитого поліетилену і їх призначення	9
1.2 Конструкція кабелів з зшитого поліетилену	12
1.3 Властивості матеріалів для кабелів з зшитого поліетилену	15
2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Вибір методу діагностики та контролю стану ізоляції кабельні лінії із зшитим поліетиленом	19
2.2 Фізика процесу старіння матеріалів ізоляції	20
2.3 Спрощена модель розрахунку терміну служби ізоляції	23
2.4 Висновки до розділу	31
3. РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ	34
3.1 Розробка математичної моделі для прогнозування залишкового терміну служби	34
3.1.1 Електричний розрахунок	35
3.1.2 Вибір товщини екрана провідника	40
3.1.3 Розрахунок електричної міцності ізоляції кабеля	40
3.1.4 Вибір ізоляції та оболонки кабелю	42
3.2 Тепловий розрахунок	43
3.2.1 Розрахунок опору струмопровідної жили	43
3.2.2 Розрахунок робочої ємності	45
3.3 Розрахунок залишкового ресурсу при заданих умовах експлуатації	45
3.4 Оцінки похибки	51
3.5. Висновки до розділу	52
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	54
4.1 Загальні вимоги електробезпеки при прокладанні кабельних ліній	54
4.2 Захист персоналу при експлуатації та обслуговуванні кабельних ліній	56

4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики під час воєнного стану	57
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	63

ВСТУП

Кабельна продукція використовується для передачі інформаційних сигналів і електричної енергії на необхідну відстань, тому вони беруть участь в роботі різноманітних електричних і радіочастотних прилади, електронні схеми і схеми. Для експлуатації будь-яких технічних пристрій, так чи інакше, потребує живлення, отже, жодна з вони не можуть повноцінно працювати без використання кабелів і проводів, які, в свою чергу, утворюють структурні системи для електроживлення і контроль роботи цих пристроїв.

Необхідність створення принципово нових видів кабельної продукції з найкращими показниками обумовлений технічним прогресом у всіх галузях. Таким чином, зростає потреба в кабельній продукції.

Характерні особливості кабельної техніки, такі як застосування висока частота, робота з високою напругою, підсилення переданої потужності і збільшення струмового навантаження, розробка нових видів спеціалізованих кабелів для роботи у середовищах високого тиску, перепадів температури, впливу агресивного середовища, призводять до підвищення вимог, що пред'являються до кабельної продукції.

Попит на електроенергію зростає, розробляються нові види силові кабелі. Для підвищення надійності кабельних ліній **актуальним** є зниження ймовірність коротких замикань, кожне з яких призводить до економічних витрат. Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є проведення контроль і оцінка стану ізоляційних матеріалів кабелю, чого можна досягти певними методами. Для того, щоб залишковий термін служби прогнозувався в залежності від часу експлуатації, до того, як ізоляція вийде з ладу, необхідно описати усі процеси, що стосуються кабелю. Це вирішується за допомогою математичних моделювання процесу старіння ізоляції кабельної продукції.

Метою дослідження є розробка сучасної моделі прогнозування залишкового ресурсу силового кабелю, ізолюваного зшитим поліетиленом.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступне :

1. Розгляд основних конструктивних елементів і матеріалів кабелів із зшитого поліетилену та їх призначення;
2. Розрахунок залишкового ресурсу кабелю, при заданих умовах експлуатації;
3. Оцінка ступенів факторів впливу на прогнозований залишковий ресурс кабелю

Об'єкт дослідження – силовий кабель із ізоляцією із зшитого поліетилену

Предмет дослідження - процес старіння та руйнування ізоляції кабеля із зшитого поліетилену та фактори що впливають на ці процеси.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в можливості застосування запропонованої математичної моделі, для оцінки терміну служби кабелю.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості розрахунку залишкового ресурсу кабеля, при заданих умовах експлуатації.

Апробація результатів магістерської роботи.

Вибрані положення роботи доповідалися на XII Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів. «Актуальні задачі сучасних технологій» – Тернопіль 6-7 грудня 2023

Структура роботи.

Робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків, переліку посилань (15 найменування).

Загальний обсяг текстової частини: 64 сторінки, 5 таблиці, 13 рисунків.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Основні конструктивні елементи кабелів із зшитого поліетилену і їх призначення

Розвиток середньовольтних розподільчих мереж встановлює необхідність експлуатації кабельної продукції, здатної передавати високе струмове навантаження. В останні роки проводилася заміна кабелів з просоченою папером ізоляцією до термостійкої екструдованої Кабелі із зшитим поліетиленом. У розвинених країнах Північної та Південної Америки і Також в європейському регіоні значна частина ринку силових кабелів займають кабелі, ізольовані зшитим поліетиленом.[1]

Переваги кабелів з пластиковою ізоляцією:

- Межа робочої температури вказана в ширшому діапазоні ніж кабелі з паперовою ізоляцією, що дозволяє значно збільшити потужність, що передається.
- Достатня довговічність в аварійних режимах, таких як перевантаження або коротке замикання;
- Можливість прокладки кабелів на об'єктах з різною висотою;
- Ізоляційні матеріали не містять важких наповнювачів, масел і свинцю, що значно прискорює монтаж, а також знижує фактори, що негативно впливають на навколишнє середовище;
- Висока експлуатаційна надійність і більш низькі економічні витрати виходу з аварійних режимів;
- Завдяки своїй конструкції мають меншу вагу і радіус вигину;
- Можливість виготовлення кабелів великої довжини;
- Одножильні та трижильні кабелі з поліетиленовою оболонкою.

Покращена механічна та термічна стійкість кабелів із зшитого поліетилену пов'язані з їхньою молекулярною структурою. На етапі

вулканізації або «зшивання» ізоляційного матеріалу нові зв'язки створюються при розподілі молекул поліетилену.

Частка кабелів із зшитим поліетиленом на російському ринку Кабельна продукція зараз зростає, таким чином, Спостерігається зростання виробництва і споживання кабелів ХРЕ.

Європейських регіонаї - PE - PolyEthylene, X - Cross-link або скорочено зшитий поліетилен.

Порівняння електромеханічних характеристик кабелів з ізоляцією

Переваги кабелів XLPE над ППІ кабелями: [2,3]

- Висока потужність, що передається (струмове навантаження) в залежності від умови прокладки кабелю (в 1,4-1,5 рази вище);

- Вищі довгостроково допустимі температури нагріву кабеля;

- При аварійних режимах (струми короткого замикання) спостерігається відносно високий термічний опір. Це пов'язано з ізоляційним матеріалом, так як кабелі ХРЕ мають більш високу максимальну граничну допустиму температуру кабелю;

- Підвищена механічна стійкість до динамічних і статичних навантажень;

- Низькі питомі пошкодження кабелів ХРЕ (в 4-5 разів нижче, ніж у кабелі БПІ);

- Більш тривалий залишковий термін служби кабелю (згідно із заявленими даними з технічного паспорту - більше 40 років);

- Меньше значення радіуса вигину, ваги, діаметра кабелю в плані ізоляції, відсутність броньованої оболонки полегшує монтаж кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену;

- Прокладка кабелю ХРЕ можлива при низьких температурах до -25°C , без попереднього прогріву конструкцій, це пов'язано з наявністю полімерних матеріалів в ізоляції та оболонці;

-В конструктивних елементах кабелю ХРЕ відсутні рідкі наповнювачі, що дозволяє скоротити вартість і час монтажних робіт;

-Вони досить екологічні за рахунок відсутності технічних масел і їх витоку в елементах кабелю ХРЕ при пошкодженні не забруднюють навколишнє середовище;

-На відміну від кабелів з ізоляцією ППШ, гігроскопічність основних елементів кабелю ХРЕ мають менше значення;

-Ізоляція має високі діелектричні характеристики;

-При проектуванні траси можливе укладання на різних висотних рівнях.

Головною відмінною рисою кабелів ХРЕ є принципово новий різновид ізоляції із зшитого поліетилену. Властивості поліетилену, як засіб ізоляції пристроїв відомі давно.

Звичайний термопластичний поліетилен має серйозні недоліки, один з основних значне зниження електричних характеристик при температурах, близьких до температури плавлення полімерного матеріалу. При досягненні температури 80 °С починаються незворотні зміни в структурі ізоляції: починає втрачати форму ізоляція, тангенс кута значно зменшується, діелектричні втрати та електрична міцність також. Зшита ізоляція поліетилену зберігає свою форму, електричну і механічну міцність навіть при 130 °С. Термін «зшивання» або «вулканізацією» мається на увазі обробка поліетилену на молекулярному рівні. Перехресні зв'язки, що утворюються в процесі зшивання між макромолекулами поліетилену, створюють тривимірну структуру, яка визначає високі електричні та механічні показники матеріалу, меншу гігроскопічність, більший робочий діапазон температур.[3]

У світовій кабельній промисловості, у кабелях використовуються дві технології зшивання, принципова відмінність який знаходиться в реагенті, за допомогою якого відбувається процес зшивання поліетилену. Технологія найбільш поширена - пероксидного зшивання, коли зшивання поліетилену відбувається з застосування спеціальних хімічних речовин – пероксидів у

навколишньому середовищі з нейтральними газами при певних температурах і тиску. Така технологія дозволяє отримати достатній ступінь зшивання на усій товщині утеплювача і стежити за тим, щоб не було повітряних включень. Крім хороших діелектричних властивостей, він також має більший, ніж кабелі з іншим матеріалом ізоляції діапазон робочих температур і відмінні механічні характеристики. Технологія пероксиду використовується в виробництві кабелів середньої та високої напруги. Менш поширене зшивання силанолом, при якому поліетилен спеціальні суміші (силани) додаються для забезпечення зшивання при нижчих температурах. Сфера застосування цієї дешевої технології охоплює кабелі низької та середньої напруги.

1.2 Конструкція кабелів з зшитого поліетилену

Існує два варіанти кабелів ХРЕ – трижильні та одножильні. В основному кабелі ХРЕ випускаються одножильними (рис. 1.1). Зовнішній вигляд одножильного кабелю ХРЕ:[4]

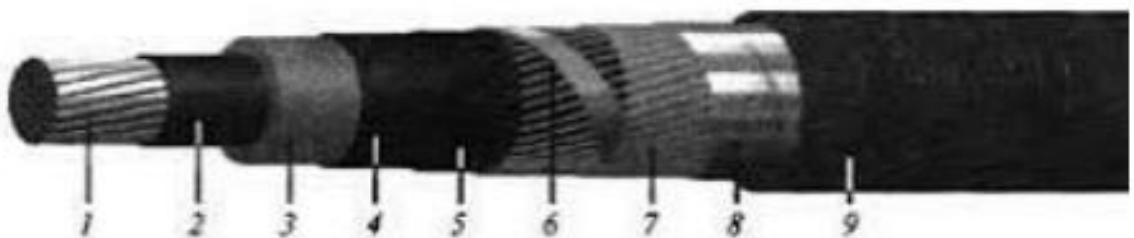


Рисунок 1.1– Одножильний кабель

- 1 - кругла багатожильна герметична струмопровідна жила,
- 2 — екран уздовж провідника з напівпровідний зшитий поліетилен,
- 3 – зшита ізоляція з поліетилену
- 4 — екран на ізоляції з напівпровідного зшитого поліетилену,

- 5 — напівпровідна стрічка, що розділяє шар, або напівпровідна водоблокуюча стрічка,
- 6 — екран з мідного дроту, скріплюється мідною стрічкою,
- 7 — розділовим шаром з двох стрічок кріпіванная папір, прогумована тканина, полімерна стрічка або водоблокуюча стрічка,
- 8 — розділовий шар алюмінієво-поліетиленова або слюдяна стрічка,
- 9 — оболонка з поліетилен, полівінілхлоридний пластикат.

Відмінна риса трижильного варіанту кабелю ХРЕ є наявність екструдованого міжфазного наповнювача з поліетилен або полівінілхлоридний (ПВХ) компаунд (рис. 1.2).[5]



Рисунок. 1.2 – трьохжильний кабель

Використання одножильних кабелів ХРЕ дає можливість забезпечити підвищену надійності електропостачання за рахунок різкого зниження ймовірності міжфазних коротких замикань. Імовірність одночасного руйнування в одному місці ізоляції двох конструктивно не з'єднаних між собою одножильних кабелів (з'єднувальні або кінцеві муфти) відповідає ймовірності міжфазного пошкодження ошиновки з ізольованими шинопроводами, тобто дуже маленькими. Імовірність однофазних замикань на землю при використанні одножильних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену набагато менше, ніж при використанні трижильних кабелів ПП.

Це досягається як самою конструкцією одножильних кабелів ХРЕ, а також кращими діелектричними властивостями ізоляції. Одножильна конструкція кабелів ХРЕ дозволяє виконувати поперечний переріз струмоведучих жил до 800 мм. Кабелі з таким перерізом успішно конкурують з шинами, що використовуються в системах електропостачання потужних підприємств.

Екранування кабелю необхідне для електромагнітної сумісності кабелю з різними зовнішніми впливами і забезпечення симетрії електричного поля навколо жили кабелю, отже, для поліпшення умов роботи ізоляції. Внутрішні екрани виготовлені з напівпровідного пластику, зовнішній екран - з мідних дротів і смуг.

Основне завдання, яке вирішує екран з мідного дроту, - це вирівнювання електричного поля, що діє на основну ізоляцію кабеля (ізоляцію жили), тобто для того, щоб екран виконував свою функцію, він повинен бути заземленим. Крім металевих екранів, конструкція має напівпровідникові екрани: один наноситься на зовнішню поверхню провідника, а інший - поверх основного ізоляційного шару кабелю на внутрішній поверхні металевих екранів. Напівпровідникові екрани забезпечують локальні вирівнювання напруженості електричного поля на негладкій поверхні провідника проводу і металевих екранів.

Ізоляція екрану призначена для запобігання попаданню води всередину кабелю, через обмотку екранних проводів в основну ізоляцію. Надійність кабелю багато в чому залежить від цілісності його оболонки. Зовнішня захисна оболонка захищає внутрішні елементи кабелю від попадання вологи і механічних пошкоджень при його монтажі і роботі. Зовнішні оболонки кабелів ХРЕ виготовляються з поліетилену або високоміцного полівінілхлоридного пластиката.

Буквено-цифрові позначення (маркування) для кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену:

А — алюмінієвий провідник, без позначення — мідний струмоведучий провідник,

PV – ізоляційний матеріал – зшитий (вулканізований) поліетилен,

П або С – оболонка з поліетилену або ПВХ пластикату,

у — армована поліетиленова оболонка збільшеної товщини,

нг – оболонка з полівінілхлоридного пластикату зниженої горючості,

Нгд- являє собою корпус з полівінілхлоридного пластикату зі зниженими димо- і газовиділеннями,

д - поздовжнє ущільнення щитка водоблокуючими стрічками,

1 або 3 - кількість провідників,

50—800 — поперечний переріз провідника, мм²,

Гж- горюча ліквідація провідника, 2 16—35 — переріз екрана, мм,

1-500 - номінальна напруга, кВ.

Приклад позначення: АПвПг 1х240/35-10 – кабель з алюмінієвою жилою (А), ізоляція ПВХ (ПВ), поліетиленова оболонка (П), Герметизація екрана (г), суцільна (1), поперечний переріз провідника 240 мм², поперечний переріз екрану 35 мм², номінальна напруга 10 кВ.

Силові кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену використовуються в будівництві кабельних ліній електропередач під землею, в траншеях, під дном річок і озер, а також в ґрунтах різних категорії. Кабелі призначені для передачі та розподілу електричної енергії при номінальній напрузі 10 кВ частотою 50 Гц трифазної мережі із заземленою нейтраллю та прямим зв'язком з повітряними лініями з лінією на трасах з необмеженою різницею рівнів.

1.3 Властивості матеріалів для кабелів з зшитого поліетилену

Своїми властивостями кабелі з ізоляцією ХРЕ є унікальні через ізоляційний матеріал. Поліетилен в даний час є одним з найбільш часто використовуваних ізоляційних матеріалів у виробництві кабелів. Але в термопластичного поліетилену є і серйозні недоліки, головним з яких є різке

погіршення механічних властивостей при температурах, близьких до температур плавлення. Вирішенням цієї проблеми стало використання кабелів із зшитого поліетилену.[6,7]

Під терміном «зшивання» мається на увазі обробка поліетилену на молекулярному рівні. Перехресні зв'язки, що утворюються в процесі зшивання макромолекул поліетилену, створюють тривимірні конструкції, що характеризуються високою електричною і механічною міцністю матеріалу, меншою гігроскопічністю, більшим діапазоном робочих температур.

Сировиною для зшитого поліетилену є високоякісний поліетилен щільність і підвищена міцність при звичайній лінійній структурі. Зшивання полягає в тому, що при високій температурі і тиску, а також під впливом електронного опромінення, а при певному хімічному сполуки об'єднують молекулярні ланцюги поліетилену в єдину тривимірну структуру.

Крім підвищеної ударної в'язкості і ударної міцності, зшитий поліетилен має надзвичайно корисні властивості, які недосяжні для інших матеріалів, які визначають основні напрямки його застосування. При прокладанні в ґрунті використовується оболонка з високої щільності, що забезпечує необхідний захист кабелю від механічних пошкодження, як при укладанні, так і в процесі експлуатації. Якщо необхідна герметизація екрану, використовуються два окремих шари водоблокуючих стрічок під мідним екраном і над ним, з перекриттям. При прокладанні кабелів в кабельних установках використовуються оболонка з полівінілхлоридного пластикату зі зниженою горючістю.

Зшитий поліетилен може вироблятися за різними технологіями зміни температури, тиску реакції, що відбувається, і супутніх речовин. При цьому отримуємо матеріали, які відрізняються за своїми властивостями. В електроізоляційній промисловості використовується:[8]

1. PEХb – поліетилен, «зшитий» хімічним силаном (або силанольним) методу. При його виробництві використовуються речовини кремневодню який

при підвищенні температури до 80-90 С бере участь в гідролізі шляхом зв'язування бічних отворів полімерних макромолекул. Порівняно дешевий метод, він дає близько 65% зшивання. Він був дуже поширений на початковому етапі використання поліетилену в якості ізоляції кабелю, але дає нерівномірний розподіл структури по всьому об'єму.

2. РЕХа «перехресні зв'язки» в присутності перекису водню, що викликає називається «пероксидним», коли температура підвищується до 400 С і Тиску 8-9 атм. Цей спосіб модифікації поліетилену більш складний і дорогий, але дає до 80% зшитих молекул і порівняно однорідний розподіл ключових фігур по об'ємі матеріалу. Отримав найбільшого використання в якості високовольтної ізоляції з великою товщиною.

Ізоляція РЕХб допускається тільки для кабелів, призначених для напруги не більше 1 кВ. При більш високій напрузі він має більш низький електричний опір, часто ламається і швидко приходить в непридатність. Для ізоляції кабелів напругою 10-35 кВ і більше використовується тільки матеріал РЕХа.

Ізоляція із зшитих зразків поліетилену використовується у виробництві одножильних і трижильних кабелів, що використовуються як в одиночних, так і в групових прокладках на відкритих місцях, в кабельних лотках, під землею. Товщина ізоляції коливається від 3,4 до 35 мм в поперечному перерізі кабелів від 35 до 3000 мм² і струмом при напрузі до 550 кВ .

Вибір матеріалу екрану залежить від того, чи є поле який впливає на кабельний виріб електрично або магнітного типу. В цілому, магнітні матеріали забезпечують більшу поглинаючу здатність випромінюваної електромагнітної енергії, а також хороші провідники, такі як мідь або алюміній мають високу відбивну здатність.

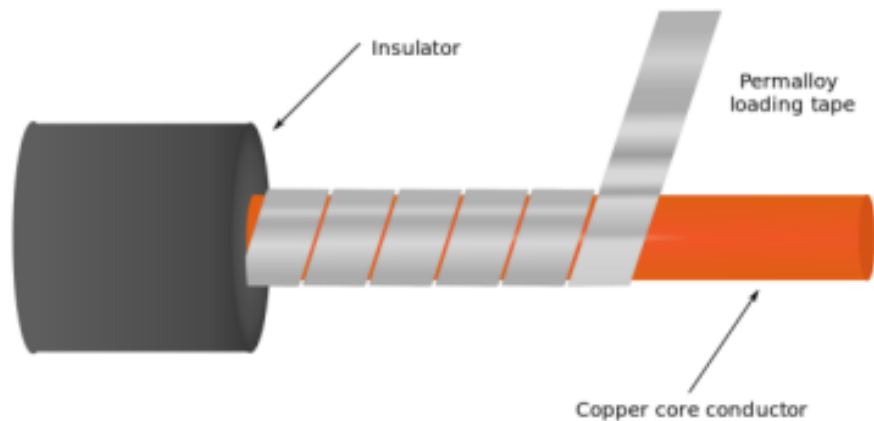


Рисунок 1.3 – Схема екранування кабелю пермалоєм

Останні більш ефективні при екрануванні електричних полів, але їх ефективність знижується зі збільшенням частоти (рис 1.3). У діапазоні низьких частот і хорошого екранування, магнітних полів можуть бути використані сплави з більшою магнітною проникністю, наприклад, латунь. Як матеріал магнітних екранів в слабких полях, сплави з високою магнітною проникністю. Пермалої, що відносяться до ковких сплавів з високою магнітною проникністю, добре обробляються різанням і штампуванням. За складом пермалої поділяються на низьконікелеві (40-50% Ni) і високонікелеві (72-80% Ni). Для поліпшення електромагнітних і технологічних властивостей пермалою часто легують молібденом, хромом, кремнієм, кобальтом, міддю та іншими елементами. Основні показники електромагнітної якості цих сплавів є значеннями початкової і максимальної магнітної проникності. Коерцитивна сила в пермалої повинна бути максимально малою, а питомий електричний опір ρ і намагнічення насичення якомога більшим.[9]

Низьконікелевий пермалой використовується для виготовлення магнітних екранів, що працюють в умовах слабких постійних магнітних полів. Легують кремнієм і хромом, низьконікелевий пермаллой використовується при більш високих частотах.

2 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

2.1 Вибір методу діагностики та контролю стану ізоляції кабельні лінії із зшитим поліетиленом

Для забезпечення надійної роботи силових кабелів необхідно оглянути їх перед введенням в експлуатацію. Превіряти можна струмопровідні жили кабелю (для забезпечення з'єднання джерела електричної енергії зі споживачем) та ізоляція (для уникнення коротких замикань). При введенні в експлуатацію кабельних ліній 6-10 кВ ізоляція із зшитого поліетилену в процесі експлуатації може здійснюватися

Наступні тести:

- 1) Перевірка цілісності та фазировки жил кабелю.
- 2) Вимірювання опору ізоляції. Величина опору нестандартизована, вимірювання опору проводиться до і після випробування підвищеною напругою.
- 3) Випробування на номінальну або перенапругу випрямленого струму (в деяких випадках проводиться випробування напругою) промислової або наднизької частоти (0,01-0,1 Гц).
- 4) Вимірювання розподілу струму по одножильних кабелях. Нерівномірність розподілу струмів по кабелях не повинна бути більше 10%.
- 5) Контроль стану антикорозійного покриття, якщо воно є.
- 6) Вимірювання опору заземлення.

Ізоляційні матеріали більш схильні до псування під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, тому найбільш слід приділити увагу випробуванню ізоляції. Стандартизована випробна напруга є руйнівною для ізоляції, оскільки, крім випалювання наявних недоліків (що утворилися в процесі виробництва або в результаті неякісного монтажу) прискорюється процес руйнування теплоізоляційного матеріалу, що призводить до утворення нові дефекти ізоляції та зменшення терміну служби. Крім того, при використанні

напруги постійного струму для перевірки кабелів виготовлених із зшитого поліетилену, вони можуть накопичуватись об'ємні заряди, наявність яких може призвести до швидкого виходу кабелю з ладу. У зв'язку з цим зараз спостерігається тенденція до впровадження неруйнівні методи контролю та діагностики ізоляції, які бувають:

- 1) Вимірювання часткових розрядів в ізоляції;
- 2) Вимірювання тангенса діелектричних втрат;
- 3) Вимірювання напруги/струму процесів поляризації/деполяризації діелектрика.

2.2 Фізика процесу старіння матеріалів ізоляці

Частковий розряд - це малопотужний електричний розряд, який шунтує лише частину ізоляції, і не викликає значних змін напруги між електродами. Як правило, часткові розряди виникають ізольовано в місці локалізації внутрішніх дефектів (бульбашки газу, різні мікрочастинки, тверді домішки) причина того, що в цих місцях спостерігається неоднорідність електричного поля, напруга якого всередині дефекту може бути набагато вище, ніж в ізоляційному матеріалі.

Як правило, діелектрична міцність домішок значно менше діелектричної міцності ізоляції, тому в місці дефекту є місцевий електричний пробій. Джерела високоінтенсивної частових розрядів зазвичай є дендритами – деревоподібними каналами неповного прориву, розвиваються з неоднорідностей, що утворюються в ізоляції під час виготовлення та експлуатації в результаті знищення та/або деполімеризації матеріалу за рахунок природного старіння. Крім того, джерелами часткових розрядів можуть бути місця неякісного монтажу, наприклад, кабельні муфти. Внутрішні дефекти ізоляції утворюються як наслідок недоліків технології виготовлення, в процесі експлуатації під впливом електричного поля виникають часткові розряди, що спричиняє зростання дендритів. Для

газонаповнених дефектів істотне значенням є в тому, що для виникнення часткових розрядів в газі вимагається менша напруженості електричного поля, так як діелектрична проникність газів менше проникності рідини та тверді тіла. Як наслідок, інтенсивність часткових розрядів може бути значно вище на початкових стадіях розвитку дефекту. Мікропори в ізоляції можуть бути заповнені водою, наявною в ізоляції у вигляді розчину або проникаючи в ізоляцію з навколишнього середовища.[10-12]

До неруйнівних методів контролю стану ізоляції відносять також складання моделей і подальший розрахунок основних параметрів кабелю з з урахуванням умов його експлуатації. Ці методи дають можливість оцінити стан ізоляції кабельного виробу в реальному часі незалежно від терміну його служби. Основні аспекти у виробництві та рішення задачі прогнозування часу роботи до погіршення ізоляції - це опис фізики перехідних процесів, відбуваються за допомогою математичного апарату або моделювання процесу старіння за допомогою спеціально розроблених програм.

При експлуатації кабелю в номінальному режимі відбувається поступове погіршення ізоляційних властивостей. Цей процес викликаний нелінійними зміни динамічних характеристик, такі як вплив зовнішніх магнітних і електричних полів, різниця температур, механічний вплив, викликаний динамічними навантаженнями на розтягнення і стиснення, вплив факторів навколишнього середовища (світло, радіації), вологість, вплив інертних газів.

На рівні хімічних реакцій, процес впливу зовнішніх впливів на швидкість розпаду молекули можна описати за допомогою закону Арреніуса:

$$K_i = K \cdot e^{\frac{-wa}{kT}}, \quad (2.1)$$

де, K_t - середня ймовірність розпаду однієї молекули за одиницю часу, змінна відповідає за швидкість хімічних реакцій;

K - коефіцієнт, матеріально-залежних речовин, що беруть участь в реакції;

W_a – Енергія активації;

k - еталонне значення постійної Больцмана.

Для кращого розуміння цього явища наводиться окремий випадок старіння ізоляції в електростатичному полі з високою інтенсивністю. На одиничну ділянку ізоляції впливає електричне поле, в результаті в цій області відбуваються часткові розряди (рис.2.1). Відбувається нелінійне наростання часткових розрядів і періодичне їх повторення Вони починають процес руйнування ізоляції, так як в ній міститься мікротріщини. При досягненні максимально допустимого значення діелектрична міцність втрачається. Для визначення та розрахунку стану ізоляційного матеріалу був виведений закон, що описує механізм утворення і розділення дефектів діелектричного матеріалу. Для досліджуваного зразка був обраний поліетилен.

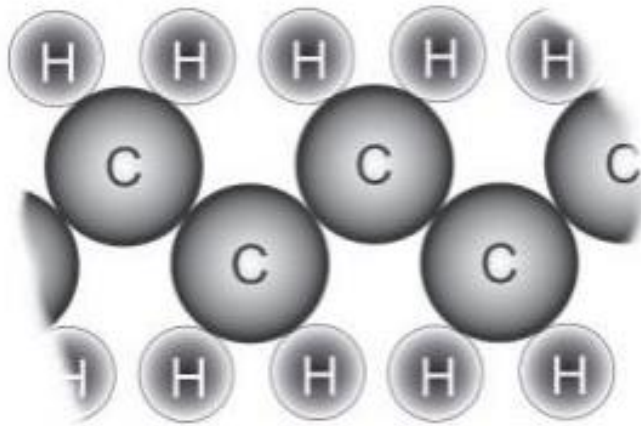


Рисунок 2.1 – Будова молекули поліетилену

У хімічній формулі поліетилену при пробої зв'язки між атомами вуглецю розриваються між собою і утворюється так званий вільний атом вуглецю, який може спричинити появу бульбашок. Отриманий незв'язаний вуглець вибивається як позитивний заряджений іон H^+ , що в свою чергу сприяє іонізації та подальшому руйнуванню молекулярної структури поліетилену в цілому і згодом, захоплюючи вільний електрон, він стає

нейтральним, а вуглець стає провідною мікрочастинкою. У той же час сусідні атоми утворюють зв'язки утворюються між собою. Причини старіння поліетиленової ізоляції неминучі, оскільки як технологічні, так і експлуатаційні. До таких дефектів можна віднести повітряні порожнини мікророзміру, сторонні домішки, тріщини і вони з'являються в ізоляції в процесі її виготовлення або укладання і функціонування кабелів за рахунок, наприклад, періодичного стиснення і розширення матеріалу в режимах навантаження. Ці мікропорожнечі заповнюються через вироблення водяної пари і наявності летких продуктів в процесі зшивання та екструзії ізоляції.

2.3 Спрощена модель розрахунку терміну служби ізоляції

Спрощена модель поліетиленової ізоляції у вигляді зрізу 100×100 молекули CH_2 , в яких може відбуватися розпад під впливом електричного поля. Уявіть собі квадрат (100×100) у вигляді системи координат, де координати пробою визначаються випадково. Окремим випадком вважається старіння ізоляція в електричному полі високої інтенсивності. Процес старіння відбувається за рахунок розвитку часткових розрядів, саме вони провокують появу в ізоляції мікротріщин, які призводять до пробою (рис. 2.2). Для визначення ступеня руйнування ізоляції, що призводить до пробою, використовується закон розподілу появи дефектів у діелектрику.

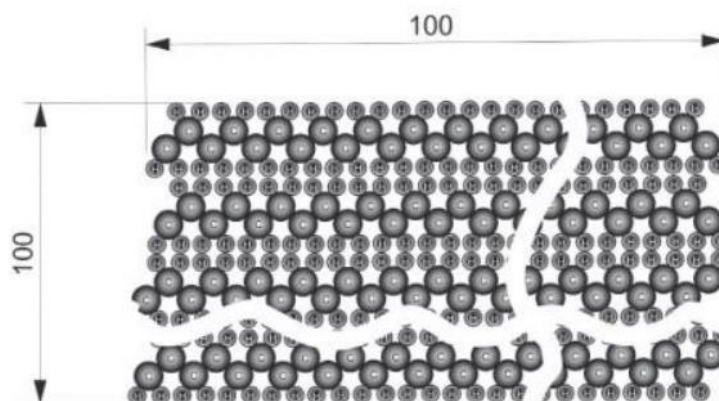


Рисунок 2.2 – Модель ізоляції у вигляді зрізу молекул 100×100

При використанні випадкової функції вибирається на основі робочої напруги кабелю 10 кВ та товщини ізоляції, координати зруйнованих клітинок, і коли 10 клітинок зі 100 руйнуються в одному напрямку вважалось, що стався пробій. Очевидно, що ця модель потребує вдосконалення (рис. 2.3). Перш за все, необхідно визначитися з критерієм пробою ізоляції, тобто ступенем руйнування матеріалу відповідно до радіусу ізоляції для пробою. Відповідно до більшості випадків пробій ізоляції відбувається в діапазоні від 300 до 500 молекул.



Рисунок 2.3 – Графік ймовірності пробою ізоляції ділянки на кількість проколотих молекул СН

Для розрахунку береться в середньому 400 молекул. Розмір поля для розрахунків - 100×100 клітин, тобто всього 10 000 молекул в польових умовах. Таким чином, щоб пробити ізоляцію, досить пробити 4% молекул, за умови, що при кожному частковому розряді буде пробиватися тільки одна молекула, тоді як в дійсності при одноразовому частковому розряді може бути пробита більша кількість молекул. [13]

Статистична модель для визначення критичного ступеня відмови ізоляційного шару. Аналіз даної моделі показав, що однією з найбільш

вірогідних форм виникнення дефекту - еліптичний, розподілений по радіусу кабелю, так само дефекти ізоляції, які призводять до пробую, зазвичай дендритні утворення — структурні канали в ізоляції наповнені рідинами, твердими речовинами або газами (рис. 2.3). Моделювання різних розмірів дефекту показали значний запас електричної міцності ізоляційного матеріалу. Для створення напруженості електричного поля вище пробивного, прийняте 6 кВ/мм для зістареного кабелю, необхідно зруйнувати близько 78% ізоляції по радіусу, згідно зображення електричного поля та розподіл напруги електричного поля в зоні дефекту.

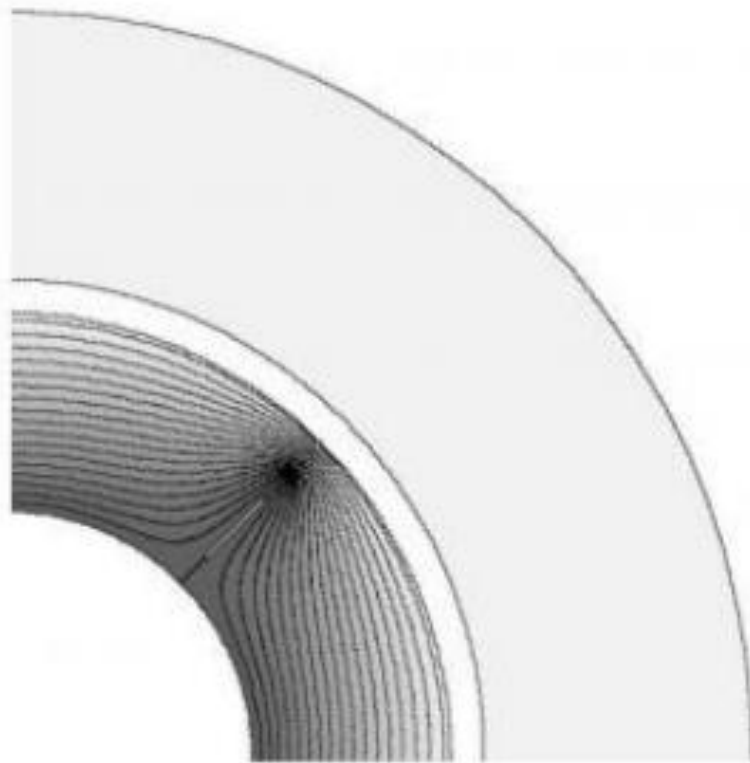


Рисунок 2.3 – Електричне поле дендритового кабелю

Для виконання розрахунку в трьох вимірах пропонується використовувати паралелепіпед зі сторонами, пропорційними розмірам ізоляції по довжині кабелю, товщини і внутрішньої площею ізоляції. Використання такої форми дозволить врахувати можливість розростання дендритів тільки вздовж радіусу. Для визначення пропорційності сторін необхідно розрахувати розміри кожної сторони. Однак для розрахунку

необхідно перевести отриману модель в об'ємний масив елементів для проведення розрахунків. Результат моделювання показав, що щільність ймовірності пробою змінюється відповідно до закону розподілу Вейбулла, яке виражається формулою:

$$f = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}$$

(2.2)

де, k - коефіцієнт форми, а λ - коефіцієнт масштабу.

Для математичного розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю необхідно знати функцію ймовірності пробою в залежності від ступеня руйнування матеріалу. Для розподілу Вейбулла це виглядає так:

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k}, \quad (2.3)$$

В результаті моделювання було встановлено, що при руйнуванні матеріалу, до 35,5%, ймовірність пробою становить менше 1%, після вона він починає стрімко зростати. Таким чином, при руйнуванні матеріалу до 35,5% ймовірність безвідмовної роботи ізоляції дуже висока. В районі від 35,5 % до 78% ймовірність пробою значно зростає, що свідчить про те, є можливість частого виникнення дефектів ізоляції.

3. Методика визначення кореляційного зв'язку між характеристиками ізоляції кабелю і характеристиками безпосередньо пов'язані з термін служби кабелю.

Основна причина виходу з ладу поліетиленових кабелів ,що знаходяться під тривалим впливом підвищеної температури і механічних навантажень (термомеханічне старіння) при експлуатаційних напруженнях, полягає в розтріскуванні оболонки і ізоляції кабелю. Кількісно тріщиностійкість оцінюється як температура холодостійкості T_x . Встановлено, що скорочення терміну служби кабелів з поліетиленовою ізоляцією в умовах експлуатації ізоляції посилена. Структурний тепловий рух елементів в полімерах і їх рухливість визначають релаксаційні переходи, які визначають методами

релаксаційної спектроскопії. Перш за все, структурна необхідність проявляється при вивченні температурно-частотних спектрів діелектричних і механічних втрат. Це було підтверджено експериментально. Спектри механічних втрат відображають ті ж процеси молекулярного руху, що і діелектричні. Для діелектричних спектрів можна виділити три основні переходи: Низькотемпературні α -максимальні втрати діелектрика визначаються рухливістю окремих груп макромолекул; β -максимум пов'язаний з сегментарною рухливістю, вона вище температури твердіння полімера. Експериментально доведено, що α - і β - максимуми знаходяться при мінусові температури за Цельсієм і не дуже інформативні. α - максимум пов'язаний з сегментарною рухливістю полярних груп уздовж поверхні кристалітів, виявляється при підвищених температурах і є інформативним. З часом в зоні α релаксації відбувається збільшення тангенса кута діелектричних втрат на максимумі залежності від температури і частоти і, найголовніше, зміщення місця максимуму тангенса дельта на температурні залежності в область більш високих температур ΔT_m приблизно на 35 °С від початкової температури до повного вичерпання ресурсу, а від частотних залежностей – в область низьких частот на частоті близько 750 Гц. Відхилення від місця розташування від вихідного стану ΔT_m або Δf_m є кількісною мірою оцінка процесу старіння. Експериментально встановлено, що між вибрані параметри – критерії ΔT_m або Δf_m і загальноприйняті критерієм – температура холодостійкості – є пряма кореляційна залежність. Ці залежності можуть бути представлені у вигляді лінійної функції

-від температури

$$T_x = 189 - 1,7\Delta T_m, \quad (2.4)$$

-від прикладеної напруги

$$T_x = 154 - 0,13\Delta f_m, \quad (2.5)$$

де, T_x - температура холодостійкості Кельвіна. У той же час, щоб визначити необхідно відрізати зразок від кабелю і визначити його значення експериментальним шляхом, тобто цей спосіб не прийнятний в експлуатації.

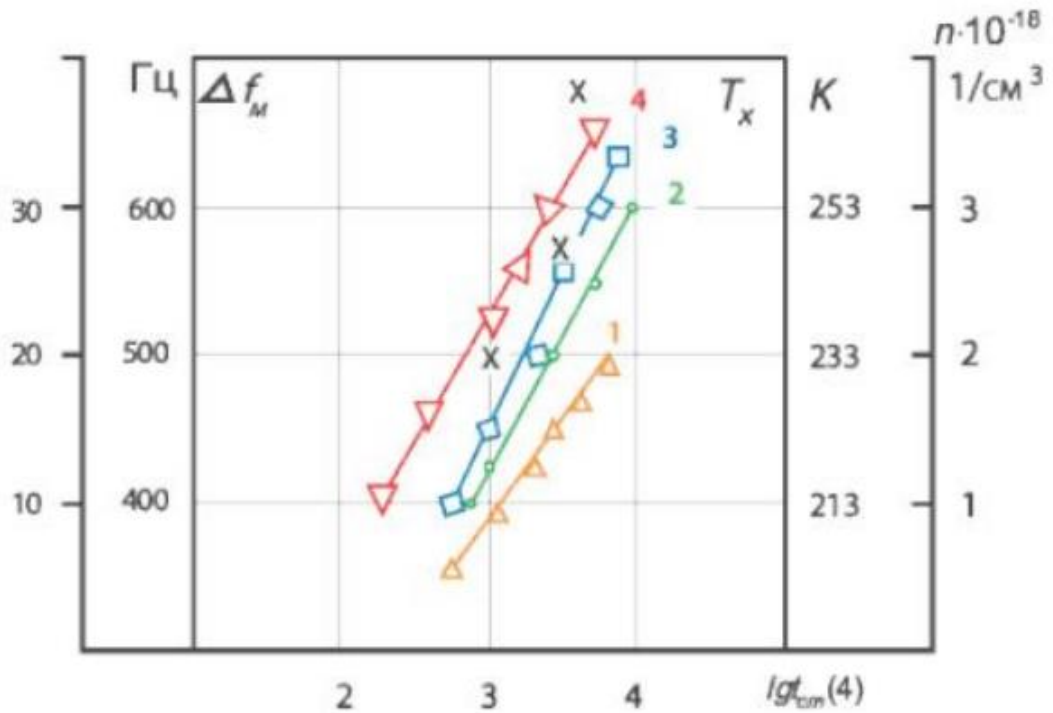


Рисунок 2.4 – Залежності параметрів старіння

При дослідженні температурно-частотних спектрів діелектричних втрат досліди проводяться на ділянках кабелю або кабельних лініях без взяття проб, тобто метод є неруйнівним (випробувальна напруга становить 30-50 В, діапазон частот до 15 кГц, що не може вплинути на ізоляцію в момент тестування). Введено поняття коефіцієнта зміни параметрівПродуктивність під час старіння:

$$K_n = (\Pi_{пр} - \Pi_n) / (\ln_{пр} - \ln_n), \quad (2.6)$$

де, $\Pi_{пр}$ Π_n - відповідне значення параметра: граничне (вичерпаний ресурс) і отримане в ході експерименту;

$t_{пр}$ - межа робочого часу, що відповідає часу роботи;

t_n - накопичений ресурс на момент вимірювання параметра Π_n .

Можна визначити накопичений ресурс

$$\tau_n = \tau_{\text{прф}} \cdot \exp \left[\frac{\Pi_n - \Pi_{\text{пр}}}{K_n} + \frac{W}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_\phi} \right) \right], \quad (2.7)$$

де, $\tau_{\text{прф}}$ - граничне значення терміну служби в режимі примусового випробування;

T_ϕ - температура старіння у форсованому режимі;

T_p - робоча температура кабелю;

W – 54 кДж/моль – умовна енергія активації процесу деструкції ПЕ.

Щоб використовувати формулу (5), потрібно спочатку визначити Критеріями ефективності є ΔT_m і Δf_m . [14] Вимірювання параметрів ΔT_m повинна здійснюватися з рівномірним нагріванням кабелю, який майже неможливо. Більш зручним параметром є Δf_m . Був Розроблено експрес-метод, що дозволяє визначати параметр Δf_m шляхом проведення Вимірювання тільки на двох частотах. Отримано формулу для визначення f_m :

$$f_m = \sqrt{f_1 \cdot f_2 \cdot \left(\frac{f_1^x \cdot \text{tg} \delta_1 - f_2^x \cdot \text{tg} \delta_2}{f_2^x \cdot \text{tg} \delta_2 - f_1^x \cdot \text{tg} \delta_1} \right)^{\frac{1}{x^2}}}, \quad (2.8)$$

де $\lambda = 0,4-0,8$ – параметр розподілу часу релаксації.

Після визначення f_m обчислюється параметр Δf_m .

Математична модель виникнення включень

У кабельних лініях електричних мереж існує різновид неоднорідності у вигляді включень, прошарків між окремими шарами, мікротріщини, відшарування ізоляції і т.д. Через перерозподіл електричне поле через різницю діелектричної проникності ϵ і питома провідність γ , тобто $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2$ або $\gamma_1 \cdot E_1 = \gamma_2 \cdot E_2$ у цих місцях неоднорідності, спостерігається висока локальна напруженість поля. Розвиток розряду в області включення, де спостерігається висока локальна напруженість поля, викликає неповний пробій ізоляції – частковий розряд. З метою виявлення закономірностей розвитку часткових розрядів в газових включеннях, визначити характеристики часткових розрядів, що беруть участь у знищенні ізоляції.

Для визначення величини області включення, процес розвитку ПДн, звідси механізми старіння і електричного пробою, необхідно визначити параметри, а саме встановити зв'язок між напруга виникнення $U_{чр}$, його максимальне значення $q_{чр}$ і товщина включення. Напруженість електричного поля в газовому полі включення перевищує польову міцність ізоляційного матеріалу, так що оскільки його діелектрична проникність значно вища за діелектрик газопроникність ($\epsilon_{газ}=1$). Якщо матеріал утеплювача напруга $U = U_m \sin \omega t$, тоді при включенні газу напруга дорівнюватиме:

$$U_B = U \cdot \frac{C_{п}}{C_B}, \quad (2.9)$$

Прикладена напруга викликає накопичення поверхневого заряду на кордоні між включенням газу і рештою діелектрика. Коли напруга досягне початкової іонізаційної напруги газу при включенні, Здатність до включення часткового розряду:

$$U_{чр} = \frac{U_{в.пр}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{C_{п} + C_B}{C_B}, \quad (2.10)$$

$$\text{де, } C_{п} = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{п} \cdot S_B}{h - h_B}, \quad C_B = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{п} \cdot S_B}{h_B}$$

$U_{в.пр}$ – пробивна напруга включення газу;

C_B – газова зона включення.

Після підстановки C_B , $C_{п}$ враховують, що $h_B \ll h$ і неоднорідність ізоляція електричного поля, отримуємо:

$$U_B = \frac{U_{в.пр}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\epsilon_{п}}{\epsilon_0} \cdot \frac{h}{\delta K_n}, \quad (2.11)$$

де, $K_n = E_{max} / E_{PC}$ – коефіцієнт неоднорідності електричного поля в ізоляції дорівнює відношенню максимального напруження E_{max} до середньої напруженості E_{PC} в ізоляційній щілині.[15]

Ізоляційний матеріал має діелектричну товщину вставки h_B , товщину діелектрика h і діелектрична проникність ізоляційного матеріалу $\epsilon_i = \epsilon_r$, де $h_B \ll h$ при робочій напрузі U , напруга комутації:

$$U_B = \epsilon_{п} \cdot \frac{h_B}{h} \cdot U, \quad (2.12)$$

Чим вище напруга, тим вище допустима напруга для ізоляції (тривала робоча напруга). Зростання застосовуваного напруга призводить до лінійного підвищення рівня часткових розрядів, а також до зниження порогу їх виникнення. При певній нарузі $U_{кр}$ - напруга критична, $\eta_{чр}$ – інтенсивність часткових розрядів різко зростає, що призводить до різкого погіршення ізоляції і скорочення терміну служби.

2.4 Висновки до розділу

Провівши дослідження, можна зробити наступні висновки - процесі експлуатації кабельних ліній електропередач з ізоляцією із зшитого поліетилену ізоляція може бути піддана ряду зовнішніх і внутрішніх руйнівних впливів, що призводять до її старіння:

1. Температурний вплив визначає швидкість хімічної реакції руйнування і деполімеризації зшитого поліетилену;
2. Висока вологість навколишнього середовища може спричинити вологість утеплювача і погіршувати його властивості. Для визначення ступеня гідратації визначається коефіцієнт поглинання, і ізоляція просушується. Крім того, вміст вологи в мікропорах ізоляційного матеріалу викликає явище водопробивання, що прискорює розвиток дефектів ізоляції;
3. Ультрафіолетове випромінювання руйнівню впливає на ізоляційну поверхню, так як фотони знаходяться в ультрафіолетовому діапазоні та мають високу енергію і руйнують молекулярну структуру ізоляції (відщеплюючи бічні групи, частіше водень) на його поверхні, призводять до підвищення твердості ізоляції, його висихання, а значить і розтріскування. Таким чином погіршуються теплоізоляційні властивості. Це явище ще називають фотохімічне руйнування.
4. Хімічний вплив виражається в різноманітних хімічних речовинах, які можуть впливати і зруйнувати ізоляцію, Наприклад, азотна кислота, яка здатна

зруйнувати поліетилен при 50% розчину, або наявність кисню з повітря, в результаті чого термічно-окислювальне руйнування;

5. Механічні напруження спричиняють руйнування міжатомних зв'язків під час виникнення механічної напруженості над енергією зв'язків атомів;

6. Вплив випромінювання на діелектрик може призвести до різних пошкодження на молекулярному рівні. Відбувається зміна структури, властивостей, стану ізолятора. Носії заряду, що утворюються в опромінюваних речовин, створюють стаціонарні і перехідні струми і призводять до накопичення об'ємного заряду в діелектриках, який може зберігатися в протязом тривалого часу. Однак розробка системи моніторингу всіх цих факторів є досить складним завданням з огляду на потребу в глибоких вивченнях природи всіх цих впливів на ізоляцію. Крім того, потрібні індивідуальні підходи до моніторингу залишкового життя кабелю, так як вплив певних факторів на ізоляцію може бути незначною, тому нею можна буде нехтувати.

Виходячи з конструкції обраного раніше кабелю, було прийнято рішення не брати до уваги можливі наступні фактори виходу з ладу ізоляційного матеріалу:

1. Вологість навколишнього середовища, так як кабель має водоблокуючі стрічки для запобігання намокання кабелів; Відомо, що поліетилен має відносно низьке вологопоглинання;

2. Ультрафіолетове випромінювання, так як має руйнівну дію впливу виключно на поверхню кабелю, тобто на його оболонку, не пошкоджуючи робочу ізоляцію, розташовану в кабелі, щоб він захищений від впливу зовнішнього сонячного випромінювання;

3. Було прийнято рішення не розглядати хімічний вплив окремо, так як всі хімічні речовини можуть перебувати в структурі ізоляції в невеликих кількостях або утворилися в результаті руйнування ізоляційного матеріалу,

отже, будуть визначатися процесами термічної деструкції, викликані нагріванням струмопровідної жили в робочому режимі кабелю;

4. Механічна напруга виражається в вигинах (при укладанні), стиснення і розтягування кабелів, викликане перепадами температур і зсуву ґрунту (при закладці в ґрунт);

5. Радіоактивне випромінювання впливає на діелектрик тільки на спеціалізованих об'єктах, наприклад, на атомних електростанціях, але ціль дослідження - розробка системи визначення залишкового ресурсу для кабелів загального призначення, що використовуються в промислових цілях.

Таким чином, виходячи з аналізу конструкції кабелів і впливів, яким може піддаватись їх ізоляція, досить врахувати в процесі старіння впливу температури і часткових розрядів, викликаних наявністю електричного поля високої напруженості.

3. РОЗРАХУНКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розробка математичної моделі для прогнозування залишкового терміну служби

Розрахунок залишкового ресурсу проводився на основі існуючої моделі старіння ізоляції в спрощеному вигляді:

$$\tau_{\text{сл}} = AE^{-n} \exp \cdot \frac{W_a}{kT}, \quad (3.1)$$

Згідно з наведеними вище висновками, термін служби ізоляції визначається потужністю часткових розрядів і швидкістю хімічної реакції при термічному і термоокислювальному руйнуванні ізоляційної речовини та визначається законом С. А. Арреніуса.

Представлення формули з урахуванням ймовірності пробою ізоляції:

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)}, \quad (3.4)$$

де, N_t - число молекул речовини в одиниці об'єму в даний момент часу,

N_0 - число молекул речовини в одиниці об'єму до початку

$N_t / N_0 = 0,645$,

B - константа,

E - напруженість електричного поля, n - показник степеня, який залежить від виду і структури матеріалу,

$K_t(T) = K_0 \cdot e(-W_a/kT)$ – коефіцієнт швидкості хімічної реакції при даній температурі в даний момент часу,

K_0 — константа швидкості реакції закону Арреніуса,

W_a - енергія активації,

k — постійна Больцмана,

T — температура в Кельвінах,

c - коефіцієнт, що визначається енергією впливу температури і електричного поля.

При цьому, щоб розрахувати залишковий ресурс, необхідно провести розрахунок кількості незруйнованих молекул матеріалу в даному об'ємі речовини для визначення ступіню його деградації. Кількість незруйнованих молекули в даний момент часу, з постійною напругою і температурою буде розраховуватися за формулою:

$$N_t = N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)}, \quad (3.5)$$

З огляду на умову, що з плином часу інтенсивність електричного поля і температури, як правило, змінюються хаотично в умовах операції, необхідно зробити розрахунок з розбивкою за часом (наприклад, один раз на секунду). Враховуючи, що напруга і температура хаотичні, пропонується зробити розрахунок по формулі

$$N_t(t) = N_0 - \int_0^t v(t) dt, \quad (3.6)$$

де $v(t)$ - функція швидкості руйнування матеріалу під загальним впливом факторів, що руйнують ізоляцію, яка може бути визначено за формулою:

$$v(t) = -\frac{dN}{dt} = c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \cdot N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)}. \quad (3.7)$$

Далі, щоб вирішити проблему прогнозування зносу ізоляції, необхідно екстраполювати функцію $N_t(t)$ з даних, накопичених за певний проміжок часу. З огляду на циклічність процесів, що відбувається в електроенергетичній системі, передбачається, що функція залишиться експоненціальною.

3.1.1 Електричний розрахунок

Підбір номінального перерізу і основних геометричних параметрів кабельної лінії для передачі потужності $P = 250$ МВА при напруги $U = 20$ кВ. Фазний струм при такій потужності і напрузі

$$I_\phi = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos\phi} = \frac{250 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,96} = 7,518 \cdot 10^3 \text{ A}, \quad (3.8)$$

Номінальний переріз жили визначається через економічної щільності струму

$$S_H = \frac{P_\phi}{J_e} = \frac{7,518 \cdot 10^3}{3,1} = 2425 \text{ мм}^2, \quad (3.9)$$

де, $J_e = 3,1 \text{ А/мм}^2$ для мідного провідника - економічна густина струму (при тривалості роботи кабелю більше 3000-5000 годин). Згідно ГОСТ 22483-2012 «Струмопровідні мідні та алюмінієві жили кабелів, проводів» максимальний переріз жили – 1000 мм^2 .

Тому, щоб можна було спроектувати кабельну лінію, для передачі заданої потужності, розділимо передаване навантаження на дві паралельні лінії, як показано на рисунку 3.1.

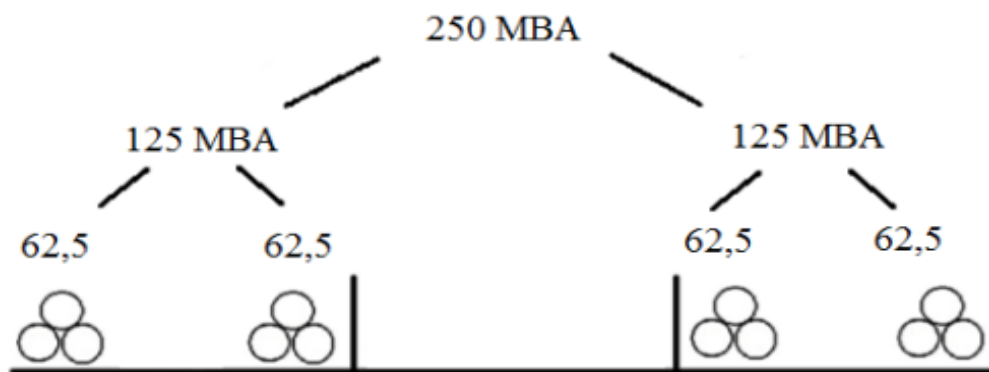


Рисунок 3.1 - Розподіл напруги на два кабелі

Розбиваємо фазу на дві кабельні лінії, в яких буде три кабелі до номінальної потужності 62,5 МВА. Враховуючи балансування навантаження 62,5 МВА для двох фаз перераховуємо фазний струм для одного кабелю.

$$I_{\Phi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos\varphi} = \frac{62,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,96} = 1,879 \cdot 10^3 \text{ А.} \quad (3.10)$$

Номінальний переріз жили

$$S_H = \frac{I_{\Phi}}{J_e} = \frac{1,879 \cdot 10^3}{3,1} = 606,257 \text{ мм}^2. \quad (3.11)$$

Згідно ГОСТ 22483-2012 «Струмопровідні мідні та алюмінієві жили кабелів, проводів» вибираємо номінальний переріз провідника 630 мм^2 перетин екрану підібрано відповідно до ГОСТ 55025-2012

Номінальний поперечний переріз мідного екрана в одножилевих кабелях і трижилевих кабелях з секторними жилами і загальним перетином

мідні екрани, накладені на кожен ізольований круглий провідник в трижильному кабелі, повинні бути не менше 16 мм² для кабелів з жилами номінального перерізу 16-120 мм², не менше 25 мм²- для кабелів з струмопровідними жилами номінального перетину 150-300 мм² і не менше 35 мм²- для кабелів з струмопровідними жилами з номінальним перетином 400 мм² і більше.

Тому вибираємо екран 35 мм².

Таблиця 3.1- Основні технічні характеристики ПвВнг(А)-LS 1х630/35

Вид клітатичного виконання	В
Категорія розміщення	1-5 по ГОСТ 15150
Клас пожежостійкості	ГОСТ 31565-2012:П168.2.2.2.
Номінальна частота ,Гц	50
Діапазон робочих температур	Від -50 до +50 Цельсія
Максимальна допустима температура жили	Тривало до 90 °С, в аварійному режимі 105 °С, в режимі КЗ- 250 °С
Максимальна допустима температура екрану в режимі короткого замикання , до 5 с.	350 °С
Тривалість роботи кабелю в режимах перевантаження ,не більше : (год)	1000(1000)
Монтаж кабелю допускається проводити при температурі не нижче	15°С
Мінімальний радіус згину	15(7,5)

За конструкцією провідник відноситься до 2-го класу гнучкості. Для прийнятого перетину мідних жил по ГОСТ 22483-77 мінімальна кількість окремих проводів в провіднику = 53. Вибираємо систему, нормальну систему скручування (всі дроти однакового діаметру) Скручування з 5 дротами по центру, N = 5 +11+17 +23 =56, що відповідає 5-му скручування з кількістю завитків 4.

Переріз однієї жили

$$S_{\text{пр}} = \frac{S_{\text{н}}}{N} = \frac{630}{56} = 11,25 \text{ мм}^2. \quad (3.12)$$

Діаметр жили

$$D_{\text{ж}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{\text{н}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11,25}{3,14}} = 3,785 \text{ мм}^2. \quad (3.13)$$

Діаметр скрученої жили

$$D_{\text{ж}} = (2n + 0,7)d_{\text{пр}} = (2 \cdot 4 + 0,7) \cdot 3,785 = 32,929 \text{ мм}. \quad (3.14)$$

Коефіцієнт заповнення жили

$$f = \left[\frac{(3n+2)n}{(2n+0,7)^2} \right] = \left[\frac{(3 \cdot 4+2) \cdot 4}{(2 \cdot 4+0,7)^2} \right] = 0,74. \quad (3.15)$$

Приймаємо кратність кроку скрутки по кожному повиву $m_2 = 18$; $m_3 = 16$; $m_4 = 15$

Діаметр кожного повиву

Место для уравнения.

$$D_1 = (2n + 0,7)d_{\text{пр}} = (2 \cdot 1 + 0,7) \cdot 4,265 = 10,22 \text{ мм}^2$$

$$D_2 = (2n + 0,7)d_{\text{пр}} = (2 \cdot 2 + 0,7) \cdot 4,265 = 17,79 \text{ мм}^2$$

$$D_3 = (2n + 0,7)d_{\text{пр}} = (2 \cdot 3 + 0,7) \cdot 4,265 = 25,36 \text{ мм}^2$$

$$D_4 = D_{\text{ж}} = 32,929 \text{ мм}^2, \quad (3.16)$$

Коефіцієнт скрутки кожного повиву

$$k_{y2} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m^2}} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{18^2}} = 1,015$$

$$k_{y3} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{16^2}} = 1,019$$

$$k_{y4} = \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{15^2}} = 1,022, \quad (3.17)$$

Загальний коефіцієнт скрутки

$$k_{y.об} = \frac{5+11 \cdot 1,015+17 \cdot 1,019+23 \cdot 1,022}{5+11+17+23} = 1,021. \quad (3.18)$$

Припустимо, що коефіцієнт ущільнення (η) дорівнює 0,9 (ущільнення буде виконувати по зовнішньому діаметру). Період ущільненої жили рівний

$$S_y = \frac{S_H}{\eta} = \frac{630}{0,9} = 700 \text{ мм}^2 . \quad (3.19)$$

Діаметр ущільненої жили

$$D_{ж} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_y}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 700}{3,14}} = 29,86 \text{ мм} . \quad (3.20)$$

Згідно ГОСТ 22483-2012 Додаток С «Граничні розміри круглих провідників» мінімальні та максимальні діаметри провідників круглого перерізу багатожильних жили з міді на перетин 630 мм² 28,7-32,5 мм.

Таблиця 3.2 – Діаметри круглих багатопровідникових мідних жил

Номінальний переріз, мм ²	Діаметр круглих мідних жил (клас 2) ,мм	
	Мінімальний	Максимальний
10	3.6	4.0
16	4.6	5.2
25	5.6	6.5
35	6.6	7.5
50	7.7	8.6
70	9.3	10.2
95	11.0	12.0
120	12,3	13,5
150	13,7	15,0
185	15,3	16,8
240	17,3	19,2
300	19,7	21,6
400	22,3	24,6
500	25,3	27,6
625	28,6	32,4
630	28,7	32,5

3.1.2 Вибір товщини екрана провідника

У силових кабелях для вирівнювання напруженості електричного поля використовують екрани. Вони дозволяють краще проводити шунтування пор та інших дефектів на поверхні жил.

Електропровідний екран із зшитого поліетилену на струмопровідному провіднику, згладжує нерівності на його поверхні, сприяючи утворенню радіального електричного поля в товщі ізоляції.

Поверх кожної струмопровідної жили кабеля із зшитого поліетилену повинен являти собою екструдований екран, виготовлений з електропровідного зшитого полімерного композита товщиною $(0,6 \pm 0,3)$ мм. Для круглих провідників номінальним перерізом 300 мм і більше і для кабелів з струмопровідними жилами секторної форми поперечний переріз 95-400 товщина екструдованого електропровідного екрану має становити $(0,9 \pm 0,3)$ мм.

Візьмемо товщину екрану по серцевині, $\Delta e = 1$ мм.

3.1.3 Розрахунок електричної міцності ізоляції кабеля

Товщина ізоляції для кабелів з пластиковою ізоляцією до середньої напруги розраховується виходячи з середньої напруженості електричного поля. Для зшитого поліетилену для $U_{ном} = 20$ кВ середнє значення напруженості електричного поля в ізоляції $E_{cp} = 2,3$ кВ/мм.

Товщина ізоляції по фазній напрузі:

$$U_{p.пер} = \frac{U_{\phi}}{E_{cp}} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 2,3} = 5,02 \text{ мм.} \quad (3.21)$$

Відповідно до вимог ГОСТ 55025-2012 для кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену напругою 20 кВ, беремо значення товщини ізоляції 5,5 мм.

Таблиці 3.3 – Номінальна товщина ізоляції від перерізу жили

Номінальний переріз кабелю, мм ²	Номінальна товщина ізоляції, мм					
	Номінальна напруга кабелю, кВ					
	6	10	15	20	30	35
35-185	2,5	3,4	4,5	5,5	8,0	8,5
240	2,6					
300	2,8					
400	3,0					
500-1600	3,2					

Діаметр екранованої жили

$$D_{\text{еж}} = D_{\text{ж}} + 2 \cdot \Delta_{\text{еж}} = 29,854 + 2 \cdot 1 = 31,854 \text{ мм.} \quad (3.22)$$

Діаметр і радіус по ізоляції

$$R_{\text{із}} = r_{\text{еж}} + \Delta_{\text{із}} = 15,927 + 5,5 = 21,427 \text{ мм}$$

$$D_{\text{із}} = 2 \cdot R_{\text{із}} = 2 \cdot 21,427 = 42,854 \text{ мм.} \quad (3.23)$$

Розрахункове значення максимального напруженості електричного поля

$$E_{\text{max p}} = \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{еж}} \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{із}}}{r_{\text{еж}}}\right)} = \frac{20 \cdot 10^3}{15,927 \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right)} = 4,233 \cdot 10^3 \frac{\text{В}}{\text{мм}}. \quad (3.24)$$

Відповідно до пункту 5.2.2.12 ГОСТ 55025-2012 пробивна напруга на електропровідному екрані поверх струмопровідної жили після електрохімічного старіння кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену у воді повинна бути не менше 23 кВт/мм, а розмір водоміру не більше 500 мкм. Значення пробивного напруження на екрані уздовж провідника кабелів зазначаються в технічних умовах на кабелі конкретних виробників.

Згідно ГОСТ 55025-2012 п. 5.2.19 поверх ізоляції із зшитого поліетилену повинен бути екструдований екран, виготовлений з електропровідного зшитого полімерного компаунда товщиною $(0,6 \pm 0,3 \text{ мм})$. Приймає товщину ізоляційний екран 0,6 мм.

$$\Delta i = 0,6 \text{ мм}$$

Діаметр і радіус ізолюваного провідника з екраном:

$$\begin{aligned} R_{\text{ек}} &= R_{\text{із}} + \Delta_{\text{ек}} = 21,427 + 0,6 = 22,027 \text{ мм} \\ D_{\text{ек}} &= 2 \cdot R = 2 \cdot 22,027 = 44,0054 \text{ мм} . \end{aligned} \quad (3.25)$$

3.1.4 Вибір ізоляції та оболонки кабелю

Поверх електропровідного екрану на ізоляції що виконана із зшитого полімеру одножильних і трижильних кабелів з жилами круглої форми форми, а також поверх жили кабелів з секторними жилами з ізоляцією із зшитого поліетилену повинна бути загорнута шаром не менше 0,2 мм завтовшки стрічкою або смужкою електропровідного паперу, або електропровідної синтетичної стрічки.

$$\Delta_{\text{л.1}} = 0,2 \text{ мм}$$

Діаметр і радіус першого розділового шару

$$\begin{aligned} R_{\text{с1}} &= R_{\text{ек}} + \Delta_{\text{л1}} = 22,027 + 0,2 = 22,227 \text{ мм} \\ D_{\text{с1}} &= 2 \cdot R_{\text{с1}} = 2 \cdot 22,227 = 44,454 \text{ м} . \end{aligned} \quad (3.26)$$

Для того аби оболонка не прилипала до мідного екрану , поверх ленти накладають розділювальний шар з склоленти номінальною товщиною 0,2 мм.

$$\begin{aligned} R_{\text{с2}} &= R_{\text{е}} + \Delta_{\text{вл2}} = 22,727 + 0,2 = 22,927 \text{ мм} \\ R_{\text{с2}} &= 2 \cdot R_{\text{с2}} = 2 \cdot 23,927 = 47,854 \text{ мм} . \end{aligned} \quad (3.27)$$

Внутрішня оболонка - полівінілхлоридний компаунд ГОСТ 55025-2012 пункт 5.2.1.12 приймаємо товщину оболонки 1,8 мм.

$$\begin{aligned} D_{\text{с3}} &= R_{\text{ш2}} + \Delta_{\text{лл}} = 23,927 + 1,8 = 25,727 \text{ мм} \\ R_{\text{с3}} &= 2 \cdot R_{\text{с2}} = 2 \cdot 25,727 = 51,454 \text{ мм} . \end{aligned}$$

(3.28)

Поверх внутрішньої оболонки накладається тепловий бар'єр з двох скляних стрічок номінальною товщиною 0,2 мм .

$$\begin{aligned} R_{\text{с4}} &= R_{\text{ш3}} + 2\Delta_{\text{тер}} = 25,727 + 2 \cdot 0,2 = 26,1127 \text{ мм} \\ D_{\text{с4}} &= 2 \cdot R_{\text{с4}} = 2 \cdot 26,127 = 52,254 \text{ мм} . \end{aligned} \quad (3.29)$$

Останнім етапом є нанесення зовнішньої оболонки полівінілхлоридного компаунда з низькою пожежонебезпекою і низькою токсичністю продуктів при горінні і тлінні.

Номінальна товщина при заданому діаметрі становить 2,9 мм

$$\begin{aligned}R_k &= R_{ш4} + \Delta_{об} = 26,127 + 2,9 = 29,027 \text{ мм} \\D_k &= 2 \cdot R_k = 2 \cdot 29,027 = 58,054 \text{ мм.}\end{aligned}\quad (3.30)$$

За результатами проведених розрахунків можна побачити, що значення діаметра кабелю що знаходиться під зовнішньою оболонкою збігалася зі значеннями по ГОСТу, а саме входила в межі 50-60 мм, для номінальної товщини зовнішньої оболонки 2,9 мм. Виходячи з цього, можна зробити висновок, що розрахунок був зроблений правильно.

3.2 Тепловий розрахунок

Розрахунок електричних характеристик

Електричні характеристики силових кабелів такі:

- Струмopровідний опір провідника ;
- Опір ізоляції;
- Ізоляційна здатність;

Розрахунок характеристик полягає у визначенні опору провідника, ізоляції і ємності кабелю в діапазоні робочих температур.

3.2.1 Розрахунок опору струмопровідної жили

Основним джерелом тепла є струмовідна жила кабелю.

Знайдемо опір жили кабелю при 15 градусах Цельсія

$$R_{ж0} = \rho_{cu} \cdot \frac{1}{S_H \cdot 10^{-6}} \cdot k_y = 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{630 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,017 = 2,778 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

(3.31)

Відповідно до ГОСТ 22483-2012, пункт 5.2.1, таблиця 4, електромонтажний опір для 630 мм² не повинно перевищувати 0,153 Ом

Опів жили при постійній напрузі та робочій температурі:

$$R_t = R_{ж0} \cdot [1 + \alpha_{cu} \cdot (t_{max} - 20)] =$$

$$= 2,778 \cdot 10^{-5} \cdot [1 + 0,0039 \cdot (90 - 20)] = 3,536 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (3.32)$$

де, α - температурний коефіцієнт міді ;

t_{\max} - довготривала допустима температура (90 °C).

Збільшення опору струмопровідного провідника при змінному струмі у порівнянні зі опором на постійному струму при робочій температурі буде рівною

$$R_T = R_t \cdot (1 + y_{\text{п}} + y_{\text{б}}), \quad (3.33)$$

де, $y_{\text{п}}$, $y_{\text{б}}$ - коефіцієнти, що характеризують збільшення опору жил за рахунок поверхневого ефекту і ефекту близькості. Дані коефіцієнти враховують форму, розмір, конструкцію та розташування кабелів

Тому потім знаходимо опір жили з урахуванням ефекту близькості і поверхневого ефекту.

Для частоти потужності параметр x визначається як:

$$x_n = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{k_n}{R_{\text{ж0}}}} = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{1}{2,778 \cdot 10^{-5}}} = 2,133, \quad (3.34)$$

k - коефіцієнт, що залежить від будови провідника, а для круглого багатожильний провідник дорівнює 1.

Поверхневий ефект (зміщення напруженості поля жили кабелю за рахунок електромагнітного поля фази) ґрунтується на формулі і:

$$y_n = \frac{x_n^4}{192 + 0,8 \cdot x_n^4} = \frac{2,12^4}{192 + 0,8 \cdot 2,12^4} = 0,182. \quad (3.35)$$

Ефект близькості (вплив електромагнітного поля фаз кабелю один на одного) ґрунтується на співвідношенні:

$$y_n \rightarrow y_n^1 \rightarrow x \rightarrow k$$

Щоб розташувати одножильний кабель трикутником, коефіцієнт близькості буде виглядати так:

$$\begin{aligned} y_{\text{б}} &= y_n \cdot \left(\frac{D_{\text{еж}}}{\alpha}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{D_{\text{еж}}}{\alpha}\right)^2 + \frac{1,18}{0,27}\right] = \\ &= 0,182 \cdot \left(\frac{35,63}{101,442}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{35,63}{101,442}\right)^2 + \frac{1,18}{y_{n2+0,27}}\right] = 0,052, \end{aligned} \quad (3.36)$$

де α - відстань між центрами жил.

Опір провідника при заданому коефіцієнті близькості і поверхневому ефекті дорівнюватиме:

$$R_T = R_t \cdot (1 + y_n + y_\sigma) = 3,536 \cdot 10^{-5} \cdot (1 + 0,182 + 0,052) = 4,289 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (3.37)$$

3.2.2 Розрахунок робочої ємності

Електрична ємність ізоляції також є важливою характеристикою ізоляції. Залежить від геометричних розмірів кабелю, кількості та форми кабелю струмопровідних жил. Величина робочої ємності пов'язана з однорідністю ізоляції, стабільності його радіальних розмірів по периметру і довжині, а в період експлуатації залежить від інтенсивності процесів старіння. Для великої кількості кабелів ємність - це стабільність технологічних процесів.

Ємність електричної ізоляції для одножильного кабелю з однорідною ізоляцією:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln\left(\frac{R_{i3}}{r_{ж}}\right)} = \frac{2,5 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right)} = 4,682 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot \text{м}, \quad (3.38)$$

де $\varepsilon = 2.5$ діелектрична проникність зшитого поліетилену

3.3 Розрахунок залишкового ресурсу при заданих умовах експлуатації

Для початку потрібно перетворити формули, виведені в розробки моделі з метою підстановки заданих в них змінних умов експлуатації. З огляду на експоненціальний характер може бути представлена у вигляді:

$$N = N_0 e^{b \cdot t}, \quad (3.39)$$

де, b - параметр експоненціальної емпіричної залежності.

Визначення параметрів функції виробляється методом найменших квадратів, сутність функції яка полягає в тому, щоб мінімізувати обчислені значення зі значень емпіричного ряду. Задача знаходження параметрів функції

зводиться до системи рівнянь лінійної апроксимації. Для цього беремо рівняння логарифмічне,

$$\ln N = \ln N_0 + bt. \quad (3.40)$$

Потім проводиться заміна

$$N' = \ln N. \quad (3.41)$$

Тоді рівняння можна представити у вигляді

$$N' = \ln N_0 + bt. \quad (3.42)$$

Виходячи з отриманого рівняння і за методом найменших квадратів, знаходження параметра b зводиться до розв'язання рівняння

$$b \cdot \sum_{i=1}^n t_i + n \ln N_0 = \sum_{i=1}^n N'_i, \quad (3.43)$$

де, n - число емпіричних значень.

Знайшовши параметр необхідно розрахувати час до виходу з ладу ізоляції і час до її повного зношування. В одній з моделей, проаналізованих в теоретичній частині було встановлено, що ізоляція буде працювати без збоїв при порушенні до 35,5%, тому відношення $Nt / N_0 = 0,645$. Тоді отримаємо, що обчислений час безвідмовної роботи ізоляції складе:

$$\tau_{бр} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0,645}{b} = \frac{0,4385}{-b}. \quad (3.44)$$

З відомим передбачуваним часом безвідмовної роботи ізоляції та часом операцій, залишок часу безвідмовної роботи можна обчислити за формулою:

$$\tau_{залбр} = \tau_{сл} - \tau_{експ}. \quad (3.45)$$

Щоб розрахувати час до повного зносу ізоляції, потрібно розрахувати час до тих пір, поки не зруйнується 78% матеріалу, отже, буде проводитися розрахунок виходячи з умови $Nt / N_0 = 0,22$:

$$\tau_{сл} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1,514}{-b}. \quad (3.46)$$

Необхідно надати дані про температуру і напругу з урахуванням добової динаміки зміни споживання електроенергії щоб показати приклад того, як працює математична модель і прогнозують знос ізоляції. Дані про температуру та напругу кабелю для прогнозування залишкового терміну служби.

Таблиця 3.4 – Дані про температуру і напругу для прогнозування залишкового ресурсу кабеля.

t, год	T,С	U,кВ
1	85	10,05
2	85	10,1
3	90	10,1
4	95	10,5
5	97	10,15
6	98	10,15
7	102	10,15
8	93	10,1
9	90	10,1
10	85	10
11	90	9,95
12	91	9,9
13	95	9,9
14	102	9,85
15	90	9,8
16	100	9,8
17	93	9,85
18	90	9,9
19	95	10
20	92	10
21	93	10
22	91	9,9
23	90	10
24	90	10

Графічне представлення температури і напруги для прогнозування залишкового ресурсу кабелю показано на рисунках 3.2 та 3.3.

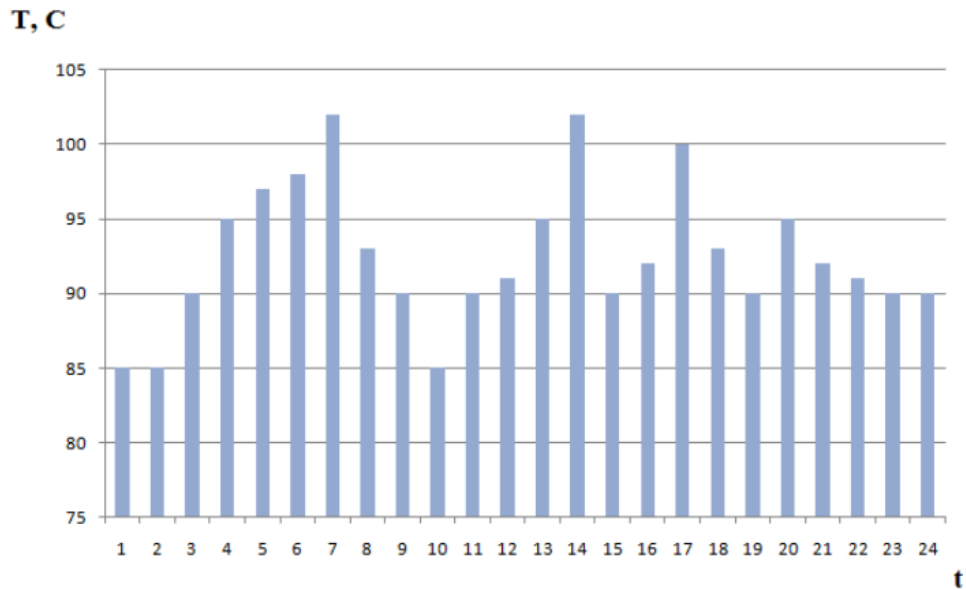


Рисунок 3.2 - Графік температури нагріву провідника від часу роботи

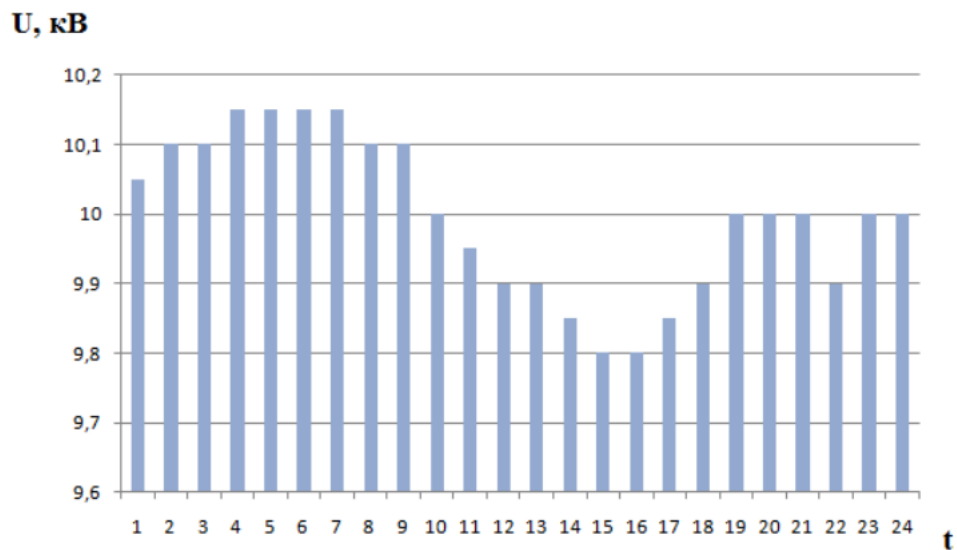


Рисунок 3.3 - Графік напруги ізоляції кабелю

Щоб розрахувати залишковий термін служби, потрібно знати всі параметри моделі старіння ізоляції для визначення швидкості руйнування матеріалу. Константу швидкості реакції можна визначити за графіком Арреніуса для процесу термічної деградації поліетилену (рис. 3.4):

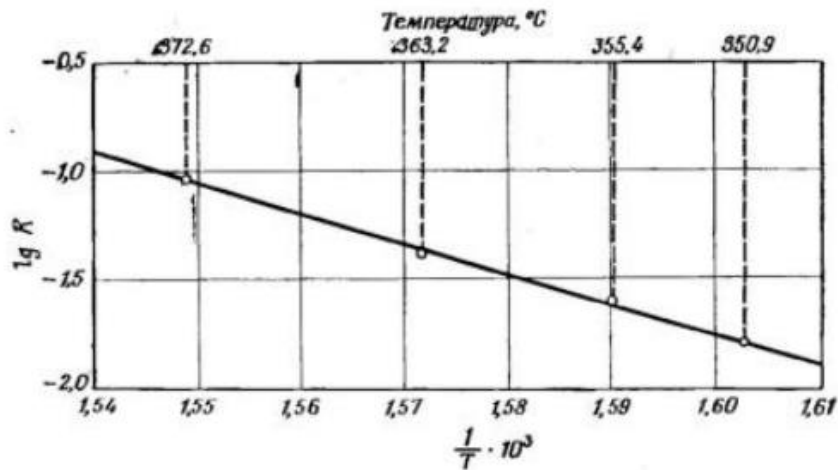


Рисунок 3.4 - Графік Арреніуса для процесу термічного руйнування поліетилену

Для визначення залежності постійної швидкості реакції від температури, потрібно знати рівняння прямої, зображеної на рисунку вище. Для цього потрібно знати координати двох точок, через які проходить пряма лінія. Припустимо, що пряма проходить через точки з координатами (0,001548;-1,05) та (0,00159;-1,7). За рівнянням прямої, що проходить через дві точки отримуємо:

$$\frac{\frac{1}{T}-0,001548}{0,00159-0,001548} = \frac{\log K_t(T)+1,05}{-1,7+1,05}. \quad (3.47)$$

Звідси отримуємо

$$\log K_t(T) = \frac{1}{T} + 22,9, \quad (3.48)$$

де, T - температура в Кельвінах.

Однак постійна швидкості реакції виражається в експоненціальній формі, тому формулу треба перетворити:

Звідси

$$\ln K_t(T) = -\frac{1}{T} + 9,945, \quad (3.49)$$

або

$$K_t(T) = 20854 \cdot e^{-\frac{1}{T}}. \quad (3.50)$$

Також необхідно визначити параметри формули потужності часткових розрядів

$$P_{\text{чр}} = B \cdot U^n. \quad (3.51)$$

Параметри формули були визначені на підставі електричного розрахунку. Значення параметрів змінювалися в процесі старіння, але в моделі пропонується брати середні значення: $B = 5,536 \cdot 10^{-3}$ $n = 5$. Параметр c , що визначає синергію впливу теплових і електричних полів приймається рівним 0,01. N_0 приймається рівним числу Авогадро. Підставляючи отримані параметри в формулу швидкості руйнування

Отримуємо:

$$v(t) = 0,01 \cdot 5,536 \cdot 10^{-3} \cdot U^5 \cdot 20854 e^{\frac{1}{T}} \cdot 6,022 \cdot 10^2 \cdot e^{-0,02 \cdot 5,536 \cdot 10^{-3} \cdot E^5 \cdot 20854 e^{\frac{1}{T}}}. \quad (3.52)$$

Функція зміни числа нерозірваних молекул матеріалу для отриманої емпіричної функції було обрано експоненціальну обчислювальну функцію з програмного комплексу Matlab (рис. 3.5).

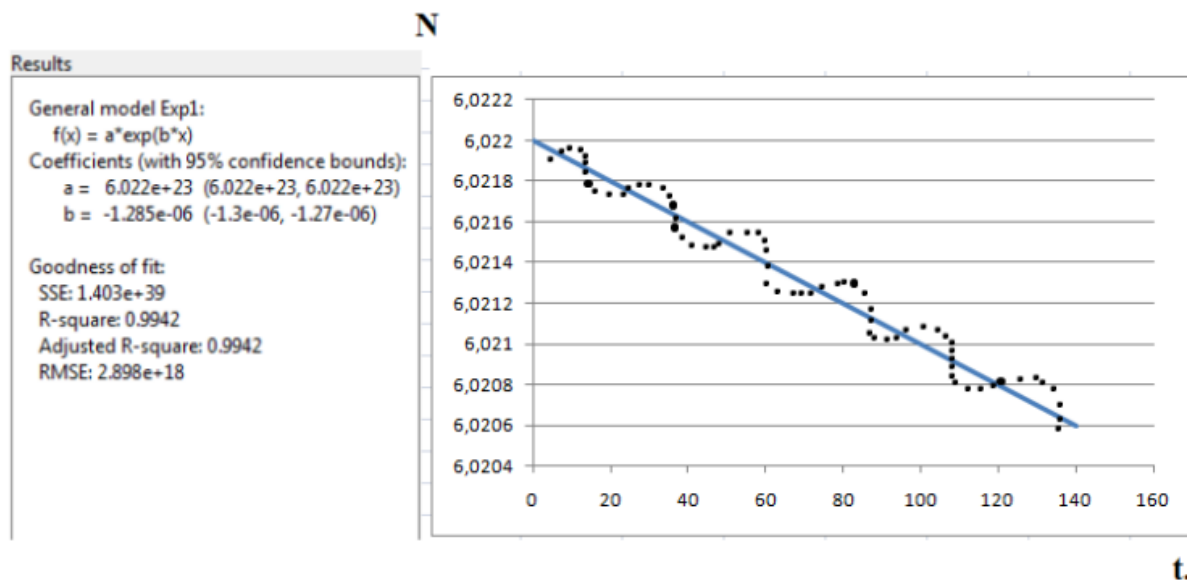


Рисунок 3.5 - Графік зміни числа незруйнованих молекул матеріалу в процесі експлуатації

Час безвідмовної роботи ізоляції становить:

$$\tau_{\text{бр}} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{0,4385}{0,00000263} = 166730 = 19 \text{ років.} \quad (3.53)$$

Термін служби ізоляції до її повного зносу становить:

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1,514}{0,0000059} = 302220 = 34,5 \text{ років.} \quad (3.54)$$

Залишковий ресурс

$$\tau_{\text{зал}} = \tau_{\text{сл}} - \tau_{\text{екс.}} \quad (3.55)$$

$$302220 - 168 = 302054 = 34,4 \text{ роки}$$

3.4 Оцінки похибки

Відносна похибка при розрахунку прогнозованого терміну служби ізоляція визначається за формулою:

$$\varepsilon_{\tau_{\text{сл}}} = \frac{\Delta \tau_{\text{сл}}}{\tau_{\text{зал}}} \cdot 100\% = \frac{2,752}{34,4} \cdot 100\% = 8\%. \quad (3.56)$$

Похибка повинна бути визначена в області робочих значень вимірюваних величин, якими є напруга, струми в жилі і екрані і температура поверхні кабелю (рис. 3.5).

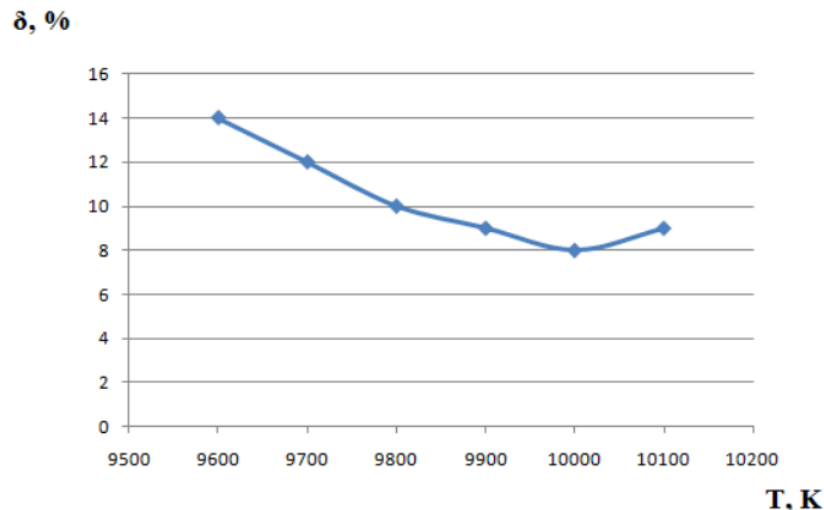


Рисунок 3.5 - Відносна похибка проти напруги

На основі отриманих результатів розрахунків, за допомогою розробленого прикладу і математичної моделі. Рекомендується оцінювати термін служби кабелів, що використовуються в помірному і холодному клімату

і закладаються в ґрунт. У цьому випадку передбачувана похибка при розрахунку терміну служби ізоляції буде на порядок 8%, (рис. 3.6).

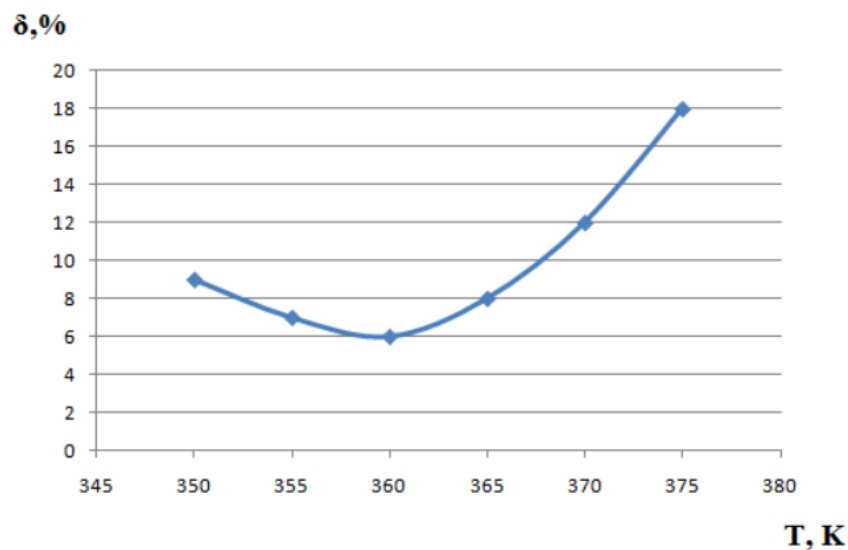


Рисунок 3.6 - Відносна похибка в порівнянні з температурою поверхні кабелю

3.5. Висновки до розділу

Розроблено математичну модель розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю, використання якого дасть можливість спрогнозувати старіння ізоляції;

Аналіз конструкції кабелю показав, що для розрахунку терміну служби ізоляції досить враховувати вплив температури і електричного поля на ізоляцію. Цей приклад показує можливість використання математичної моделі у пристрої контролю залишкового ресурсу ізоляції. Аналіз відомих математичних моделей старіння ізоляції показав подібний характер зміни терміну служби в залежності від впливів. Як еталонна математична модель, вважають модель яка ґрунтується на енергетичних впливах на ізоляцію.

Розроблено математичну модель для розрахунку залишкового терміну служби ізоляції кабелю дозволяє прогнозувати старіння ізоляції і необхідність її заміни, коригувань, зроблених після огляду та результатів експериментальних досліджень. Важлива перевага моделі полягає в її

доцільності в контролю залишкового ресурсу ізоляції. Результати експериментальних досліджень вимагали коригування математичної моделі для визначення залишкового ресурсу ізоляції, так як була виявлена невідповідність між результатами розрахунку і тим, що математична модель не враховує фактори, що руйнують ізоляцію, крім напруги і температури. Для коригування моделі, введена відносна похибка з урахуванням впливу інших факторів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Загальні вимоги електробезпеки при прокладанні кабельних ліній

При виконанні магістерської роботи на тему " Прогнозування ресурсу силових кабелів із зшитого поліетилену керуються Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), а також Правилами безпечної експлуатації електроустановок. Згідно цих правил до прокладання кабельних ліній застосовуються наступні вимоги :

- силові кабельні лінії монтуються таким чином, щоб у процесі монтажу та експлуатації унеможливити виникнення в них небезпечних механічних напружень і пошкоджень, для цього кабелі укладаються з запасом по довжині на 1%-2% для компенсації можливих зсувів ґрунту та температурних деформацій зсувів ґрунту та температурних деформацій самих кабелів і конструкцій, по яких їх прокладено; у траншеях і на поверхах усередині будівель запас створюють укладанням кабелю «змійкою», а по кабельних конструкціях – провисанням у прогонах між конструкціями; укладати запас кабелю у вигляді кілець (витків) заборонено;

- кабелі, що прокладені горизонтально по конструкціях, стінах, перекриттях жорстко закріплюються в кінцевих точках з обох боків у місцях згинання і безпосередньо біля муфт будь-якого типу; одножильні кабелі необхідно закріплювати по всій довжині немагнітними хомутами, які мають силу розриву, вищу від розрахованої сили між двома кабелями під час короткого замикання (додаток А, А.6 ПУЕ);

- кабелі, прокладені вертикально по конструкціях і стінах, треба закріплюються таким чином, щоб унеможливити деформацію оболонок і не порушувати з'єднання жил у муфтах під дією власної ваги кабелів;

- конструкції, на яких укладають неброньовані кабелі, виконуються таким чином, щоб унеможливити механічне пошкодження оболонок кабелів, у тому числі від вібрації (на мостах, естакадах); у місцях жорсткого кріплення

оболонки цих кабелів захищаються від механічних пошкоджень і корозіїз використанням еластичних прокладок;

- металеві конструкції, які підтримують кабелі в разі їх розташування просто неба - оцинковуються;

- кабелі (у тому числі броньовані) в місцях, де є механічні пошкодження (рух автотранспорту, механізмів і вантажів, доступ для сторонніх осіб), захищаються по висоті на 2 м для кабелів напругою до 10 кВ, 3 м – для кабелів напругою 35 кВ та вище від рівня підлоги або землі та на 0,3 м у землі (2.3.99 ПУЕ);

- у разі прокладання кабелів поряд з іншими кабелями, які знаходяться в експлуатації, вживаються заходи для попередження пошкодження останніх. Не дозволено експлуатацію кабелів, які мають пошкоджену ізоляцію кабелю чи струмопровідного екрана або ізоляцію, яка втратила в процесі експлуатації захисні властивості;

- під час прокладання кабельних ліній уникається перетину їх між собою. За необхідності перетину з кабельними лініями, що є прокладеними у ґрунті, керуються вимогами (п. 2.3.69 ПУЕ), а в інших випадках у місцях перетину використовуються багаторівневі лотки або кабелі розділяються перегородками для кабельних ліній, що є виконані з негорючих матеріалів для запобігання пошкодженню електричною дугою кабелів різних кабельних ліній у разі виникнення короткого замикання (КЗ) на одному з кабелів.

- кабельні мережі напругою до 35 кВ обладнуються селективним захистом від однофазного замикання на землю (ОЗЗ), що діє на вимикання, крім випадків, пов'язаних з порушеннями важливих технологічних процесів. В електричних мережах з номінальною напругою 6 кВ, 10 кВ, 15,75 кВ і 27 кВ у разі, якщо захист від ОЗЗ діє тільки на сигнал, а час перебування кабельної лінії в режимі однофазного замикання на землю може становити понад 8 год (до усунення пошкодження), застосовується підвищений клас ізоляції кабелю,

а саме: 10 кВ – у мережі 6 кВ; 15 кВ – у мережі 10 кВ; 20 кВ – у мережі 15,75 кВ; 35 кВ – у мережі 27 кВ (ПКЕ).

Кабельні споруди та конструкції, на які укладають кабелі, треба виконувати з негорючих матеріалів відповідно до класифікації за ДСТУ Б В.2.7-19-95 (ГОСТ 30244- 94) «Будівельні матеріали. Методи випробувань на горючість». У кабельних спорудах заборонено встановлювати будь-які тимчасові пристрої, а також зберігати в них матеріали та устаткування. Тимчасові кабелі необхідно прокладати з дотриманням усіх вимог, які поширюються на кабельні прокладання з дозволу експлуатаційної організації.

4.2 Захист персоналу при експлуатації та обслуговуванні кабельних ліній

В магістерській роботі розглянуто кабель з ізоляцією із зшитого поліетилену. В процесі експлуатації можливі пошкодження ізоляції кабелю. Після ремонту згідно Правил безпечної експлуатації електроустановок (ПБЕЕ) проводиться випробування кабелю. А саме:

- вимірювання опору ізоляції. Опір ізоляції вимірюють мегаомметром на напругу 2,5 кВ протягом 1 хв до і після випробування кабелю підвищеною напругою. Згідно ПБЕЕ вимірювання опору має дозвіл проводити одноосібно особа з другою групою з електробезпеки;
- випробування підвищеною напругою. Значення та параметри випробної напруги і тривалість випробування приймається згідно табл.1.8.39 ПУЕ;
- випробування кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену випрямленою напругою призводить до погіршення стану ізоляції внаслідок накопичення об'ємних зарядів по товщині ізоляції і на поверхні напівпровідникових шарів. Тому КЛ з ізоляцією із зшитого поліетилену випробовують змінною напругою наднизької частоти 0,1 Гц або напругою промислової частоти, значення якої дорівнює номінальній лінійній напрузі мережі, прикладеній між жилою кабелю і мідним екраном. Для кабелю 20 кВ,

що був вибраний в магістерській роботі значення складать - при частоті промислової значення випробної напруги - 20 кВ на час 5 хв, при частоті 0.1 Гц - 36 кВ на час 30 хв. Під час проведення випробувань випрямленою напругою, періодично і на останній хвилині випробування, спостерігають за показами міліамперметра, тим самим визначають струм витоку. Якщо під час випробування струм витоку наростає або з'являються поштовхи струму, то тривалість випробування збільшують у два рази. Абсолютне значення струму витоку не являється бракувальним показником. У разі випробувань КЛ змінною напругою наднизької частоти 0,1 Гц або напругою промислової частоти результати випробувань вважають задовільними, якщо під час прикладення напруги не відбувся пробій ізоляції кабелю .

Під час таких робіт керівник робіт повинен бути з четвертою групою з електробезпеки. Член бригади що проводить дослід повинен бути одягнений в індивідуальні засоби захисту - діелектричні боти, діелектричні рукавиці, спеціальний одяг та повинен стояти на ізолювальному килимку(згідно ПБЕЕ).

4.3 Підвищення стійкості роботи об'єктів енергетики під час воєнного стану

Наслідком масивних ракетних атак рф на енергетичну інфраструктуру України на початку весни і, особливо, у жовтні-листопаді 2022 року виявилась вразливість централізованої організації енергозабезпечення громад .Особливої критичності набула вразливість централізованих систем тепло- і електрогенерування і транспортування у міському середовищі, де відсутні альтернативні джерела генерації і доставки тепло- і електроенергії до окремих осель багатоквартирної і, особливо, високоповерхової забудови .У такій ситуації жителі України і їхні друзі по всьому світові відреагували масовим імпортом електрогенераторів (ЕГ) на двигунах внутрішнього згоряння (ДВЗ) та електрзарядних станцій (ЕЗС). Згодом місцева влада ввела в дію фінансові заходи з метою компенсації частини вартості енергогенеруючих установок

.Такі заходи частково вирішили проблеми громадських закладів, переважно розташованих на нижніх поверхах. Але експлуатувати ЕГ на базі ДВЗ в помешканні не представлялося можливим внаслідок високих рівнів шкідливих викидів і шуму.ЕЗС були придатні до часткового вирішення проблеми електрозабезпечення і використовувались переважно для підтримки мобільного зв'язку, освітлення та інших малопотужних електронних пристроїв. Про обігрів осель з допомогою ЕЗС взагалі не йшлося через недостатню (низьку) щільність акумульованої енергії (Дж) на одиницю маси установки (кг) і значно вищу вартість цієї одиниці (Дж/кг) від ЕЗС.Сонячні панелі також не були в стані виправити дефіцит енергозабезпечення домогосподарства через недостатню потужність, відносно високу ціну і меншу кількість сонячного світла в осінньо-зимовий період. Про вітрову енергію в умовах великого міста годі й казати.Повернення до старого перевіреного методу опалення осель біопаливом, або попросту кажучи — дровами, було можливо лише в умовах приватного будинку за наявності справного димаря. Для більшості ж жителів великого міста, які проживають в багатоквартирних висотних будинках, ця опція взагалі не прийнятна ані з технічної, ані з безпекової точок зору.

Деякі жителі частково намагались вирішувати проблему обігріву оселі користуючись відкритим полум'ям газових плит у разі наявності централізованого газопостачання. Але цей спосіб малоефективний та ще й небезпечний. До того ж у великих містах є багато житлових висотних будинків без централізованого газопостачання, де натомість використовуються кухонні електроплити.Тобто ситуація об'єктивно була і залишається поганою. Попри певне відновлення централізованої енергосистеми після зниження уражень об'єктів енергетичної інфраструктури станом на середину 2023 року завдяки значному посиленню системи ППО і ПРО України, жодної 100% гарантії захисту цих об'єктів, допоки триває російська агресія, ніхто надати не в змозі.

Достатньо згадати в цьому контексті зупин Запорізької АЕС і підрич Каховської ГЕС разом із дамбою водосховища російським агресором.

Отже, узагальнюємо проблему, формулюючи водночас завдання для її вирішення: яким чином / методами / рішеннями посилити стійкість енергозабезпечення населення у вкрай несприятливих надзвичайних умовах, якими є війна? Коли стандартні методи не працюють, настає час звернутися до нестандартних інноваційних рішень. Напряч пошуку рішення — автономізація енергозабезпечення на різних рівнях, починаючи з особи, оселі, домогосподарства і так далі. Розпочнімо з водневих електрогенераторів на базі паливних елементів (ПЕ) . Розмаїття рішень вражає. Але є одне з ключових обмежень — це логістика чистого водню. Водень можна зберігати в газоподібному, рідкому та твердому станах, і кожен метод має свою унікальну перевагу. Незважаючи на те, що поводження зі стисненим і зрідженим воднем є зрілими технологіями, для промислового застосування потрібні відповідні заходи для вирішення проблем високого тиску — приблизно до 100 МПа або низької температури — біля 20°К. Навіть в умовах мирної Європи — це поки що важко підйомна проблема. Про Україну в умовах воєнного стану — годі й казати. Є інші рішення — водень у твердій фазі у складі хімічної сполуки, зокрема, гідриди металів або вуглеводні сполуки включно зі зрідженими газами.

Питання вибору залежатиме від зрілості і доступності технології. Мій конкретний вибір припав на технологію, що точно є поширеною на побутовому рівні. Це використання побутового газу, наприклад, пропану в балонах. Ця технологія зберігання і використання широко доступна від пластикових балончиків для заправки газових запальничок до побутових 10, 20, 50 і більше літрових побутових балонів, що використовуються в приватних домогосподарствах переважно для приготування їжі. В результаті пошуку мені вдалося знайти виробника ЕГ на ПЕ, який здійснив важливий крок — адаптував ЕГ на ПЕ під використання пропану. Тут назва виробника опущена,

щоб стаття не виглядала як рекламне просування. Пропан на вході ЕГ перетворюється на водень і двоокис вуглецю внаслідок відомої в індустрії процедури парової конверсії або, так званого, риформінгу, що застосовується для промислового вироблення водню:

Які достоїнства має подібна установка ЕГ на ПЕ:

- її можна ставити у приміщенні (вдома) — вона компактна (власне ЕГ на 1.25 кВт має розмір 20x30x40 см і вагу біля 9 кг); не шумить — відсутні рухомі частини; викиди — CO₂;
- попутно видає тепло — це ідеальне рішення взимку; фактично такий ЕГ є теплоелектростанцією (ТЕС);
- не потребує обслуговування — приміром від побутового 20 л балону з пропаном установка на 1.25 кВт працюватиме без зупину і догляду 3.5 доби.

Що важливо, технологія вже доведена до серійного виробництва. Тобто це вже готове рішення.

Обмежуючі фактори та додаткові вимоги:

- Зрозуміло, кожна медаль має дві сторони. Отже, які про які недоліки, обмеження і вимоги може йти мова:
 - Установка ЕГ на ПЕ потребує тривалого запуску — 10–20 хвилин і додаткової стартової енергії через потребу довести паливний елемент і реакторний відсік для риформінгу до робочої температури 500–600°C.
 - Установка в існуючому вигляді не призначена для утилізації тепла, тому потребує додаткового теплообмінного модуля.
 - Процедура риформінга не на 100% ефективна і, як наслідок, у викидах присутній СО. Тому використання всередині приміщення вимагатиме певних заходів з відведення викидів назовні.
 - Висока ціна — зараз обладнання випускається виробником малою серією для спеціальних жорстких умов експлуатації. Щоб завести це обладнання, скажімо, на український ринок потрібно його кардинально

здешевити, зокрема, шляхом організації виробництва великої серії, оптимізації конструкції, здешевлення комплектуючих тощо.

- Для багатьох застосувань має сенс використовувати ЕГ на ПЕ у сполученні з ЕЗС.

Розглянутий тут варіант ТЕС призначений для забезпечення стійкості та автономності енергозабезпечення (тепла і електрики) на різних масштабах, починаючи з особи, оселі, домогосподарства і так далі для вкрай суворих умов експлуатації. Обладнання просте в установленні і обслуговуванні, в якості палива використовує широко доступний пропан або побутовий газ, що мають розвинену логістику доставки або трубопроводами або балонами різної місткості.

Безумовно подібне обладнання також представляє практичний інтерес для спеціальних застосувань (військові, дослідницькі експедиції, інше), де вимогою є високонадійне компактне автономне тепло- і електрозабезпечення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі приведені результати теоретичних досліджень по прогнозуванні ресурсу силових кабелів із зшитого поліетилену. На базі отриманих результатів зроблено наступні висновки:

1. Показано, що основними чинниками, що впливають на термін служби кабелю є; температура, вологість, ультрафіолетове випромінювання, хімічні речовини що руйнують ізоляцію, механічні пошкодження, які можуть бути як при процесі неякісного монтажу, так і в процесі експлуатації. Вибір матеріалу екрану залежить від того, чи є поле яке впливає на кабельний виріб електрично або магнітного типу.
2. Розроблена математична модель для розрахунку залишкового терміну служби ізоляції кабелю дозволяє прогнозувати старіння ізоляції і необхідність її заміни. Визначено, що термін служби ізоляції визначається потужністю часткових розрядів і швидкістю хімічної реакції при термічному і термоокислювальному руйнуванні.
3. Для кабелю марки ПвВнг(А)-LS 1x630/35 проведено розрахунок електричної міцності ізоляції, розрахункове значення максимального напруженості електричного поля становить $4.233 \cdot 10^3$ В/мм.
4. Тепловий розрахунок кабелю показав, що в діапазоні робочих температур опір струмопровідної жили становить $4.289 \cdot 10^{-5}$ Ом, а ємність електричної ізоляції $4.628 \cdot 10^{-10}$ Ф·м. Залишковий ресурс експлуатації 34.4 роки.
5. За результатами експериментальних досліджень показано що, відносна похибка при розрахунку прогнозованого терміну служби ізоляція в області робочих значень вимірюваних величин, становить 8%.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сабарно, Л. Р. Дослідження впливу експлуатаційних та метеорологічних факторів на рівень ушкоджуваності та стан ізоляції розподільних мереж. 2016.
2. А. М. Губіцький, М. С. Наконечний. Методи діагностики стану кабельних ліній з ізоляцією із ршитого поліетилену, 1. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 6–7 груд. 2023.)– Тернопіль: ТНТУ, 2023. – С. 249
3. Розрахунок допустимих навантажень на кабелі з шитого поліетилену / Э. Т. Ларина [та ін.] // Електротехніка. – 1991. – № 3. – С. 28–31.
4. Camerlingh Onnes H. Expression of the equation of state of gases and liquids by means of series // Comm. Leiden. — 2016. — No 71. — P. 1 – 25.
5. Mayer J.E. The statistical mechanics of condensed systems// J.Chem. Phys. – 1937. – V.5. – No.1. – P. 67-74.
6. Neher J.H., McGrath M.H. The calculation of the temperature rise and load capability of cable systems // AIEE Transactions – Power Apparatus and System. Part III. 2012. V. 76. P. 752–772.
7. George J. Anders. Rating of Electric Power Cables: Ampacity Computations for Transmission, Distribution, and Industrial Applications// IEEE Press power engineering series. –2000 P. 428.
8. Electric Cables – Calculation of the current rating – Part 1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – Section 1: General. IEC Standard 287– 1– 1 (2007– 12).
9. Electric Cables – Calculation of the current rating – Part 2: Thermal resistance – Section 1: Calculation of the thermal resistance. IEC Standard 287–2–1 (2009–12).

10. Electric Cables –Calculation of the current rating – Part 3: Section on operating conditions –Section 1: Reference operating conditions and selection of cable type. IEC Standard 287–3–1 (2008–07).
11. Vollaro Roberto de Lieto, Fontana Lucia, Vallati Andrea. Thermal analysis of underground electrical power cables buried in non-homogeneous soils // Applied Thermal Engineering. 2011. V. 31. P. 772–778.
12. Lyall J.S., Nourbakhsh G., Zhao H.C., Underground power cable environment on line monitoring and analysis // Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting. – Washington. 2000. P. 457–462.
13. Tai-Tien Electric Co., LTD., XLPE Power Cable // Handbook. – 2017. P. 95
14. Правила улаштування електроустановок: [арх. 15 березня 2020] / Міненерговугілля України. — Київ : [б. в.], 2017. — 617 с.
15. Izadi M., Razavi F. Energy Loss Reduction in a 20-kV Distribution Network Considering Available Budget //Journal of Applied Science and Engineering. – 2017. – Т. 20. – №. 1. – С. 21-30