

**СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ**
Факультет інженерії
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

**до кваліфікаційної магістерської роботи
освітньо-кваліфікаційного рівня магістр**

галузі знань 14 електрична інженерія

зі спеціальності 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

**на тему ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ, ЩО
ІЗОЛЬОВАНІ ЗШИТИМ ПОЛІЕТИЛЕНОМ**

Виконав: студент групи ЕЕ-22дм

Єфименко І. В. _____
(прізвище, та ініціали)

Керівник

доц. Філімоненко Н. М. _____
(прізвище, та ініціали)

Завідувач кафедри

доц. Руднєв Є. С. _____
(прізвище, та ініціали)

Київ
2023 р.

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії
Кафедра електричної інженерії
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Напрямок підготовки 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри
доц. Руднєв Є. С.

« ____ » _____ 2023 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ

Єфименку Ігореві Володимировичу

1. Тема проекту **ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ, ЩО ІЗОЛЬОВАНІ ЗШИТИМ ПОЛІЕТИЛЕНОМ**

2. Керівник проекту доц., к.т.н. Філімоненко Ніна Миколаївна
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального № 564/15.23-С від 23.10.2023.

Строк подання студентом проекту 05 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Вихідні данні визначені в переліку питань, що підлягають розробці в магістерській роботі

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Огляд літературних джерел; основні конструкційні елементи кабелів зі зшитого поліетилену та їх призначення; основні методи діагностики та контролю стану ізоляції алгоритм розрахунку кабелів 20 кв зі зшитого поліетилену; розрахунок залишкового ресурсу при заданих умовах експлуатації

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Плакати, що пояснюють суть магістерської роботи, презентація.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 - 3	доц. Філімоненко Н. М.		

7. Дата видачі завдання _____ 16 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	16.10-30.10.2023	
2.	ОСНОВНІ КОНСТРУКЦІЙНІ ЕЛЕМЕНТИ КАБЕЛІВ ЗІ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ ТА ЇХ ПРИЗНАЧЕННЯ	30.10-07.11.2023	
3.	ОСНОВНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ТА КОНТРОЛЮ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ	05.11-20.11.2023	
4.	РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО КАБЕЛЮ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ	20.11-01.12.2023	
5.	АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ КАБЕЛІВ 20 КВ ЗІ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ.	01.12-05.12.2023	
6.	ВИСНОВКИ. ОФОРМЛЕННЯ МР.	02.12-06.12.2023	

Студент _____

Єфіменко І. В.

Керівник проекту _____

доц. Філімоненко Н.М.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота Єфіменко І. В. «ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОГО РЕСУРСУ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ, ЩО ІЗОЛЬОВАНІ ЗШИТИМ ПОЛІЕТИЛЕНОМ». Сторінок – 80; Рисуноків – 20; Таблиць –8; Джерел посилань – 21.

Робота присвячена вивченню залежності терміну служби кабельного виробу від основних експлуатаційних факторів.

Здійснено розрахунок безвідмовного терміну служби на основі даних про стан ізоляції, отриманих з допомогою розрахункової частини. Розроблена математична. Модель розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю дозволяє спрогнозувати знос ізоляції і необхідність її заміни зобліком коригування. Важливим в застосуванні моделі є її реалізованість в пристрої моніторингу залишкового ресурсу ізоляції.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КАБЕЛЬНИЙ ВИРІБ, РЕСУРС, ПОШИТИЙ ПОЛІЕТИЛЕН, ПОЛІВІНІЛХЛОРИД, ТЕРМІН ЖИТТЯ, СТРУМОВА НАВАНТАЖЕННЯ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, НАПРУЖЕНІСТЬ, ТЕМПЕРАТУРА, ПРОГНОЗУВАННЯ, СИЛОВІ КАБЕЛІ.

SUMMARY

Ihor Yefimenko. «STUDY OF THE TECHNICAL RESOURCE OF POWER CABLES INSULATED WITH CROSSED POLYETHYLENE» VOLODYMYR DAHL EAST UKRAINIAN NATIONAL UNIVERSITY. ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT, gr. EE-22dm. – Kyiv, 2023.

Pages – 80; Drawings – 20; Tables –8; Sources – 21.

The work is devoted to the study of the dependence of the service life of the cable product on the main operational factors.

The failure-free service life was calculated based on the data on the state of the insulation, obtained with the help of the calculation part. Developed mathematical. The model for calculating the residual resource of the cable insulation allows you to predict the wear of the insulation and the need for its replacement, taking into account the adjustment. Important in the application of the model is its implementation in the device for monitoring the residual insulation resource.

KEY WORDS: CABLE PRODUCT, RESOURCE, CROSS-LINKED POLYETHYLENE, POLYVINYL CHLORIDE, LIFETIME, CURRENT LOAD, MATHEMATICAL MODEL, TENSION, CORE HEATING, FORECASTING, POWER CABLES

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

СПЕ – зшитий поліетилен

ПВХ – полівінілхлорид

КЗ – коротке амикання

БПІ – паперово просочена ізоляція

РЕ-Х або XLPE - полімер етилену з поперечно зшитими молекулами

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	13
1.1 Основні конструкційні елементи кабелів зі зшитого поліетилену та їх призначення	13
1.2 Компоненти ізоляційного матеріалу	21
РОЗДІЛ 2 ОСНОВНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ТА КОНТРОЛЮ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ	24
2.1 Основні методи діагностики та контролю стану ізоляції кабельних ліній з ізоляцією зі зшитого поліетилену	24
2.2 Фізика процесу старіння ізоляції матеріалу	25
2.3 Опис існуючих моделей для розрахунку ресурсу ізоляції	28
2.4 Аналіз впливів, наданих зовнішніми і внутрішніми факторами на ізоляцію кабелів в процесі експлуатації	37
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО КАБЕЛЮ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ	42
3.1 Електричний розрахунок	42
3.2 Тепловий розрахунок	53
3.3 Розрахунок залишкового ресурсу при заданих умовах експлуатації	66
3.4 Оцінка отриманих результатів	75
ВИСНОВКИ	76
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ	77

ВСТУП

Кабельні вироби використовуються для передачі інформаційних сигналів і електричної енергії на необхідну відстань, таким чином, вони беруть участь в експлуатації різноманітних електричних та радіочастотних пристроїв, електронних ланцюгів і схем. Для роботи будь-якого технічного пристрою, так чи інакше, необхідне живлення, отже, жодний з них не може повноцінно працювати без використання кабелів та проводів, які в свою чергу утворюють структурні системи для електропостачання та контролю роботи даних пристроїв.

Необхідність створення принципово нових типів кабельних виробів з найкращими характеристиками викликана технічним прогресом у всіх сферах промисловості. Таким чином, спостерігається зростання потреби в виробках кабельної продукції.

Характерні особливості кабельної техніки, такі як застосування високої частоти, експлуатація при високих напругах, підвищеної потужності, що передається, і збільшення струмового навантаження, розробка нових типів спеціалізованих кабелів для роботи в умовах високого тиску, перепадів температур, впливу агресивних середовищ, вимагають підвищення вимог, застосовуваних до кабельним виробів. Виникає необхідність створення нових матеріалів, в результаті чого стане можливим використання спеціальних кабелів з покращеними характеристиками, що експлуатуватимуться у різних галузях промисловості.

Аналіз досвіду експлуатації маслонаповнених кабелів показав, що підвищення їх пропускної спроможності можливе при максимальному збільшенні перерізів жил і рівнів номінальної напруги. Проте, зростання номінальної напруги призводить до ускладнення теплових режимів експлуатації через збільшення товщини ізоляційного шару і, отже, діелектричних і активних втрат, а так само втрат в металевих оболонках.

Сьогодні існують наступні об'єктивні чинники, що перешкоджають подальшому використанню маслонаповнених високовольтних кабелів :

- складність конструкції і технології виготовлення кабелю, його монтажу і великі експлуатаційні витрати;
- істотні діелектричні втрати в ізоляції і низька пропускну спроможність із-за обмежень температурного режиму;
- високі вимоги до кваліфікації монтажного і експлуатаційного персоналу;
- можливість розгерметизації маслонаповнених кабелів при проведенні монтажних і аварійно-відновних робіт, що приводить великим втратам масла і екологічному забрудненню довкілля

Останнім часом у вітчизняній електроенергетиці збільшується промислове виробництво і застосування кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену.

Це обумовлено удосконаленням технології виготовлення і конструкції кабелів, пов'язані з підвищенням їх експлуатаційної надійності.

Масове впровадження в електроенергетику кабелів нового покоління може бути здійснене при обліку трьох взаємозв'язаних і таких, що суперечать один одному, чинників :

- збільшення межі передаваної потужності;
 - підвищення експлуатаційної надійності;
 - зниження вартості виготовлення і монтажу, а також експлуатаційних витрат.
- екологічна і електромагнітна сумісність кабелів з техно- і біосферою.

Проте є об'єктивні труднощі, пов'язані з масовим застосуванням кабелів з пластмасовою ізоляцією. Наприклад, в маслонаповнених кабелях локальні порожнечі, що утворюються, не перевищують товщини паперу, заповнюються ізолюючою олією. У кабелях з ізоляцією із СПЕ на стадії виготовлення можуть виникати повітряні мікропорожнини, внутрішні механічні ушкодження і різні включення, що призводить до зниження електричної міцності і скорочення терміну служби ізоляції.

Окрім цього, при проектуванні електропостачання промислових підприємств, технологічний цикл яких пов'язаний з появою в напрузі на шинах їх розподільних пристроїв високочастотної складової напруги і струмів, необхідно передбачати спеціальні заходи, що перешкоджають дії цих гармонійних складових на електроустаткування живильної мережі, а саме кабельні мережі. Наявність високочастотних струмів призводить до істотних негативних наслідків. Відбувається перегрівання та прискорене теплове старіння ізоляції.

Термін "зшивання" пояснюється як обробка поліетилену на молекулярному рівні. Поперечні зв'язки, що утворюються в процесі зшивання між макромолекулами поліетилену, створюють тривимірну структуру, яка і визначає високі електричні і механічні характеристики матеріалу, меншу гігроскопічність, більший діапазон робочих температур

Зшитий поліетилен ідеально підходить для ізоляції високовольтних кабелів. Використовуючи сучасну технологію, процес вулканізації (зшивання) поліетиленової ізоляції робиться хімічним способом в середовищі нейтрального газу при тиску 8-9 атмосфер і температурі 285-400°C. В результаті хімічної реакції змінюється молекулярна структура поліетилену, і утворюються нові міжмолекулярні зв'язки, що призводить до зміни електричних і механічних властивостей речовини. Ізоляція і електропровідні екрани накладаються в процесі потрійної екструзії, після чого відбувається одночасне зшивання усіх трьох шарів. Така технологія забезпечує хорошу адгезію між екранами і ізоляцією, а також відсутність газових включень в ізоляції і на межі з екранами.

Виділяються чотири технології виробництва PE-X :

- пероксидная (нагрів у присутності пероксидів);
- силанова (обробка вологою, в яку заздалегідь був імпантований силан + каталізатор);
- електронна (бомбардування електронами);
- азотна.

Поперечні зв'язки, що утворюються в процесі зшивання між молекулами поліетилену, в основному і визначають основні характеристики нового матеріалу

такі як, високі діелектричні властивості, ширший діапазон робочих температур і підвищені механічні характеристики.

XLPE кабель може замінити кабель з паперовою ізоляцією практично в усіх випадках. Ці кабелі мають численні переваги, такі як:

- висока пропускна спроможність;
- низька вага, менший діаметр і радіус вигину до 7,5 зовнішніх діаметрів;
- низька ушкодженість;
- поліетиленова ізоляція має малу щільність, малі значення відносної діелектричної проникності і коефіцієнта діелектричних втрат;
- можливість прокладення на складних трасах;
- монтаж без використання спеціального устаткування при температурі до -10°C ;
- значне зниження собівартості прокладення.

Застосування цих кабелів в порівнянні з традиційними в полівінілхлоридній ізоляції дозволяє:

- використати жили меншого перерізу для передачі рівного потоку потужності;
- збільшити тривало допустиму температуру нагріву жил кабелів до 90°C ;
- збільшити тривало допустиму температуру нагріву жил кабелів при короткому замиканні до 250°C .

В основному кабелі випускаються в одножильному виконанні, а застосування різних типів оболонки і можливість герметизації дозволяє використати кабель як для прокладення в землі, так і для кабельних споруд, у тому числі при груповому прокладенні.

Перехід від кабелів з паперовою просоченою ізоляцією до кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену, пов'язаний зі все зростаючими вимогами експлуатуючих організацій до технічних параметрів кабелів. В цьому відношенні переваги кабелів із XLPE очевидні.

Найбільш доцільне і ефективно застосування кабелів із XLPE при:

- застосовані на напрузі 10,15,20,35 кВ, попри те, що первинні капітальні витрати на кабель з паперово-масляною ізоляцією будуть нижчі;
- при необхідності передачі великої потужності, наприклад передача потужності від генератора на шини розподільного облаштування теплової електростанції. В якості альтернативи розглядалися спорудження мідного шинопровода, прокладення 8-12 паперових кабелів або декількох кабелів із XLPE ізоляцією перерізом 630 або 800 кв.мм. Як показує практика, застосування поліетиленових кабелів дозволяє досягти економії не лише за рахунок кабельних ліній, але і за рахунок зменшення витрат на будівельну частину.
- XLPE кабель рекомендується використати, коли кабель з паперовою ізоляцією максимального перерізу не проходить по пропускній спроможності. Оскільки пропускна спроможність поліетиленового кабелю вище і максимальний переріз жили може досягати 800 мм² доцільніше використати один кабель великого перерізу. Це стосується і випадків прокладення паралельних кабелів, коли замість двох паралельних кабелів 240 мм². доцільніше прокласти один кабель перерізом 500 мм².
- якщо на трасі прокладення є велика різниця рівнів. При використанні паперово-масляних кабелів відбувається осушення ізоляції кабелів у високих точках, що може спричинити пробій. При цьому навіть невелика різниця рівнів прокладення може стати причиною численних ушкоджень на кабельних лініях;
- при особливих вимогах до надійності електропостачання, оскільки здатність до пошкодження XLPE кабелів надзвичайно мала.

Узагальнюючи викладене, можна зробити висновок, що застосування в кабельній техніці ізоляційних матеріалів з поліпшеними діелектричними і тепловими властивостями дозволяє істотно підвищити пропускну спроможність кабельних ліній і за рахунок цього збільшити надійність електропостачання споживачів.

Потреби в електроенергії зростають, розробляються нові типи силових кабелів. Для підвищення надійності кабельних ліній необхідно знизити ймовірність виникнення коротких замикань, кожне з яких викликає економічних

втрат. Одним з рішень даної проблеми є контроль і оцінка стану ізоляційних матеріалів кабелю, котрий можна досягти певними методами. Для забезпечення прогнозування залишкового ресурсу в залежності від часу експлуатації до виходу з ладу ізоляції необхідно описати всі процеси, що впливають на кабель. Це вирішується шляхом математичного моделювання процесу старіння ізоляції кабельного виробу.

У магістерській роботі систематизовано інформацію за темою. Ця тема актуальна в сучасному світі тому, що в даний час в галузі електроенергетики поставлено завдання на масову цифровізацію. Завдяки аналізу даних, отриманих актуальною моделлю прогнозування залишкового ресурсу, стає можливим в режимі реального часу дізнатися стан ізоляції в кабельному виробі, в наслідок чого винести рішення про подальшу експлуатацію кабелю, або ж відправлення його на регламентні роботи.

Мета магістерської роботи – розробка актуальної моделі прогнозування залишкового ресурсу силового кабелю з ізоляцією із зшитого поліетилену.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- розгляд основних конструктивних елементів і матеріалів силового кабелю із зшитого поліетилену та їх призначення;
- опис фізики процесу старіння ізоляції;
- аналіз існуючих моделей для розрахунку ресурсу кабелю;
- обґрунтування критеріїв вибору параметрів моделі;
- розрахунок залишкового ресурсу кабелю, при заданих умовах експлуатації;
- оцінка ступеня впливу факторів, що відбиваються на прогнозованому залишковому ресурсі кабелю.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Основні конструкційні елементи кабелів зі зшитого поліетилену та їх призначення

Розвиток енергорозподільчих мереж на середню напругу задає необхідність експлуатації кабельних виробів, що спроможні передавати велике струмове навантаження. Протягом останніх років ведеться заміна кабелів з паперово-просоченої ізоляцією на термостійкі екструдовані кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену. У розвинених країнах Америки, а також в європейському регіоні, велику частину ринку силових кабелів займають кабелі, ізольовані зшитим поліетиленом.

Переваги кабелів на середню напругу з пластмасовий ізоляцією:

- межа робочої температури знаходиться в більше високих чисельних значеннях, чим у кабелів з паперовий ізоляцією, що дозволяє значно збільшити потужність, що передається;
- достатня стійкість при роботі в аварійних режимах, таких як навантаження або коротке замикання;
- можливість прокладки кабелю на об'єктах із різними заввишки рівнями;
- ізоляційні матеріали не містять важких наповнювачів, масел та свинцю, що значно прискорює встановлення, монтажні роботи і експлуатацію, а також знижує фактори, що несприятливо впливають на навколишню середовище;
- висока надійність при експлуатації та менші економічні витрати на

відновлення по після-аварійними режимами;

- за рахунок своєї конструкції мають меншу вагу і величину радіусу вигину;
- можливість виготовлення кабелів великої будівельної довжини;
- конструктивне виконання у вигляді одножильних та трижильних кабелів з оболонкою з поліетилену.

Поліпшені характеристики механічної і термічної стійкості кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену пов'язані з їх молекулярною структурою. На етапі вулканізації чи «зшивки» ізоляційного матеріалу створюються нові зв'язки шляхом розподілу молекул поліетилену.

Частка кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену на українському ринку кабельної продукції в теперешній час збільшується, таким чином, спостерігається зростання виробництва та споживання **XLPE** кабелю. Для позначення даного типу кабелю в Україні використовується абревіатура XLPE, VPE, СПЕ (PE - PolyEthylene, X - Cross-linked або скорочено XLPE).

Порівняння електромеханічних характеристик кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену з БПП-кабелями:

- висока потужність, що передається (струмова навантаження), яка є залежна від умов прокладання кабелю (у 1,4-1,5 рази вище);
- більш високі значення тривало допустимої температури нагріву кабелю;
- при виникненні аварійних режимів (струмів короткого замикання) спостерігається більш висока термічна стійкість. Ця величина пов'язана з матеріалом ізоляції тому, що СПЕ-кабелі мають більшу граничну температуру роботи кабелю;
- підвищена механічна стійкість до динамічних і статичних навантажень;
- низька питома ушкоджувальність СПЕ-кабелів (4-5 раз нижче, чим у БПП-кабелів);
- більший залишковий ресурс кабелю (за заявленим даними з технічного паспорта - більше 40 років);
- менше значення радіуса вигину, маси, діаметра кабелю з ізоляцією,

відсутність армованої оболонки. Це полегшує умови монтажу кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену;

- прокладка СПЕ-кабелю можлива за низьких температур до -25°C , без попереднього обігріву конструкцій, це обумовлено наявністю полімерних матеріалів у ізоляції і оболонці;

- у конструктивних елементах СПЕ-кабелю немає рідких наповнювачів, що дозволяє зменшити вартість та час монтажних робіт;

- досить екологічні через відсутність технічних масел та їх витоку в елементах СПЕ-кабелю, при пошкодженні не забруднюють навколишню середовище;

- на відміну від кабелів з БПІ- ізоляцією гігроскопічність основних елементів СПЕ-кабелю має менше значення;

- ізоляція має високі діелектричні характеристики;

- при проектуванні траси можлива прокладка при різних рівнях кабельних ділянок.

Головна відмінність СПЕ-кабелів – принципово новий вид ізоляції, що виготовлена із зшитого поліетилену. Властивості поліетилену, як засобу для ізоляції пристроїв, відомі досить давно. Звичайний термопластичний поліетилен має серйозні недоліки, одне з головних - значне зниження електричних показників при температурах, близьких до температури плавлення полімерного матеріалу. При досягненні температури в 80°C починаються незворотні зміни в структурі ізоляції: вона починає втрачати форму, значно знижується тангенс кута діелектричних втрат, та електрична міцність. Ізоляція зі зшитого поліетилену зберігає форму, електричні і механічні характеристики навіть при температурі 130°C . Термін «зшивка» або «вулканізація» має на увазі обробку поліетилену на молекулярному рівні. Поперечні зв'язки, утворюються в процесі зшивки між макромолекулами поліетилену, створюють тривимірну структуру, яка і визначає високі електричні і механічні характеристики матеріалу, меншу гігроскопічність, більший діапазон робочих температур.

У світовій кабельній промисловості при виробництві силових кабелів використовуються дві технології зшивки, принципове відмінність яких полягає в реагенті, за допомогою якого відбувається процес зшивки поліетилену. Найбільше поширення отримала технологія пероксидної зшивки, коли зшивка поліетилену відбувається з використанням спеціальних хімічних речовин - пероксидів у середовищі нейтрального газу при певних температурі і тиску. Така технологія дозволяє отримати достатню ступінь зшивки по всій товщині ізоляції та забезпечити відсутність повітряних включень. Крім хороших діелектричних властивостей, це й більший, ніж у інших кабельних ізоляційних матеріалів, діапазон робочих температур і чудові механічні характеристики. Пероксидна технологія застосовується при виробництві кабелів середньої і високої напруги. Менш поширеною є силанольна зшивка, при якій до поліетилену додаються спеціальні суміші (силани) для забезпечення зшивання при більш низькій температурі. Сектор застосування цієї більше дешевої технології охоплює кабелі низької та середньої напруги.

Існують два варіанти виконання СПЕ-кабелів — трижильний та одножильний. У здебільшого СПЕ-кабелі випускаються в одножильному виконанні (рис. 1.1). Зовнішній вигляд одножильного СПЕ-кабелю: 1 – кругла багатодротяна ущільнена струмопровідна жила, 2 — екран по жилі з напівпровідного зшитого поліетилену, 3 – ізоляція зі зшитого поліетилену, 4 - екран по ізоляції з напівпровідного пошитого поліетилену, 5 – роздільний шар з напівпровідної стрічки або напівпровідної водоблокуючої стрічки, 6 — екран з мідних дротів, скріплених мідний стрічкою, 7 – роздільний шар з двох стрічок кріпрованого паперу, прогумованої тканини, полімерної стрічки або водоблокуючої стрічки, 8 – роздільний шар з алюмополіетиленової або слюдовмісною стрічки, 9 – оболонка з поліетилену, ПВХ – пластикат.

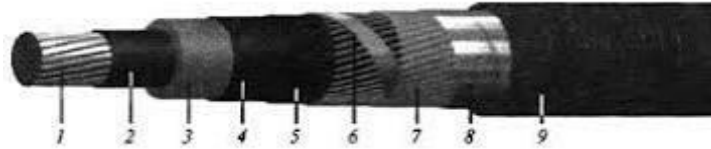


Рисунок 1.1 – Одножильний СПЕ-кабель

Відмінною особливістю трижильного виконання СПЕ-кабелю є наявність екструзованого міжфазного наповнювача з поліетилену або полівінілхлоридного (ПВХ) пластикату(рмс.1.2).

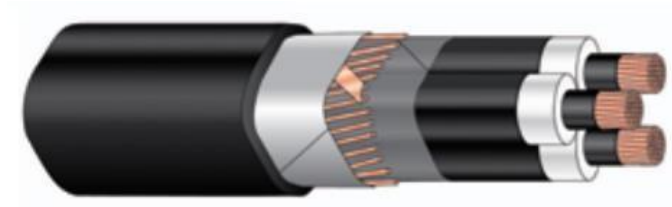


Рисунок 1.2 – Трижильний СПЕ-кабель

Застосування одножильних СПЕ-кабелів дозволяє забезпечити, перш за все, підвищену надійність електропостачання за рахунок різкого зниження ймовірності міжфазних коротких замикань. Ймовірність одночасного руйнування в одному місці ізоляції двох конструктивно не пов'язаних між собою одножильних кабелів (з'єднувальних або кінцевих муфт) відповідає ймовірності міжфазних ушкоджень ошинівки з ізольованими шинами, тобто дуже мала. Ймовірність однофазних замикань на землю при використанні одножильних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену набагато менше, ніж при використанні трижильних БПІ-кабелів. Це досягається як самою конструкцією одножильних СПЕ-кабелів, так і кращими діелектричними властивостями ізоляції. Одножильне виконання СПЕ-кабелів дозволяє виконувати переріз струмопровідних жил до 800 мм^2 . Кабелі з таким перерізом здатні успішно конкурувати з струмопроводами, які використовуються в системах

електропостачання енергоємних підприємств.

Екранування елементів кабелю необхідно для електромагнітної сумісності кабелю з різними зовнішніми ланцюгами та для забезпечення симетрії електричного поля навколо жили кабелю і, отже, для створення більше сприятливих умов роботи ізоляції. Внутрішні екрани виконуються з напівпровідної пластмаси, зовнішній екран - з мідних дротів і стрічок.

Основним завданням, яке вирішує екран із мідних дротів, є вирівнювання електричного поля, що впливає на головну ізоляцію кабеля (ізоляцію жили), тобто для виконання своїх функцій екран повинен бути заземлений. Крім металевого екрану в конструкції є напівпровідні екрани: один наноситься на зовнішню поверхню жили, а інший – поверх шару головної ізоляції кабелю на внутрішню поверхню металевого екрана. Напівпровідні екрани забезпечують локальне вирівнювання напруженості електричного поля шорсткій поверхні дротяної жили і дротяного металевого екрану. Ізоляція екрану призначена для уникнення потрапляння води в кабель, через повиви дроту екрану в головну ізоляцію. Надійність кабелю в багато в чому залежить від цілісності його оболонки.

Зовнішня захисна оболонка захищає внутрішні елементи кабелю від потрапляння вологи і механічних ушкоджень при його монтажі і експлуатації. Зовнішні оболонки СПЕ-кабелів виготовляються з поліетилену або ПВХ-пластикату підвищеної міцності.

Умовні буквено-цифрові позначення (маркування) кабелів з ізоляцією з зшитого поліетилену:

А – алюмінієва струмоведуча жила, ні позначення – мідна струмоведуча жила,

ПВ – матеріал ізоляції – пошитий (вулканізований) поліетилен,

П або В – Оболонка з поліетилену або ПВХ-пластикату,

У – посилена поліетиленова оболонка збільшеною товщини,

НГ – оболонка з ПВХ-пластикату зниженою горючості,

НГД – оболонка з ПВХ-пластикату зниженого димогазовиділення,

Г – поздовжня герметизація екрану водоблокуючими стрічками,

1 або 3 – кількість струмопровідних жил, 50-800 - переріз струмоведучою жили, мм²,

ГЖ – герметизація струмопровідної жили,

2 16-35 – перетин екрану, мм ,

1-500 – номінальне напруга, кВ.

Приклад позначення: АПвПг 1х240/35-10 - кабель з алюмінієвий житловий (А), СПЕ-ізоляцією (Пв), поліетиленової оболонкою (П), герметизацією екрану (г), одножильний (1), перетин жили 240 мм, перетин екрану 35 мм, номінальне напруга 10 кВ.

Силові кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену використовуються при будівництві кабельних ліній електропередачі під землею, в траншеях, кабельної каналізації, по дну річок та озер, а також у ґрунтах різних категорій. Кабелі призначені для передачі і розподілу електричної енергії при номінальній напрузі 10 кВ частоти 50 Гц трифазних мережах із заземленою нейтраллю та прямим зв'язком з повітряною лінією або без неї на трасах з необмеженою різницею рівнів(рис.1.3).

Конструкція:

Багатодротяна, кругла, ущільнена струмопровідна жила, алюмінієва або мідна, клас гнучкості жили 1. Жили перетином 1000 мм² і 1200 мм² – сегментовані, скручені за системою "Міллікен".

Внутрішній екструдований електропровідний шар. Ізоляція з пероксидношитою поліетилену.

Зовнішній екструдований електропровідний шар. Шар обмотки електропровідної полімерної стрічкою або електропровідним папером, або електропровідної водоблокуючої стрічкою (кабелі з індексом «Г» або «2Г»)

Екран із мідних дротів. Можливе введення в екран розподіленого оптичного датчика температури.

Мідна стрічка.

Алюмополімерна стрічка для кабелів з індексом "2Г".

Зовнішня оболонка з поліетилену, ПВХ-пластикату або пластикату зниженої горючості, що не містить галогенів (кабелі з індексом «нг(А)», "HF").

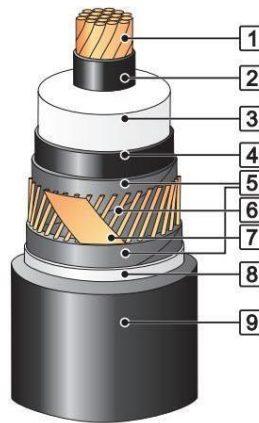


Рисунок 1.3 – Конструкція кабелю СПЕ

Накладення внутрішнього напівпровідного шару, ізоляції і зовнішнього напівпровідного шару поверх провідника з міді або алюмінію виготовляється в один технологічний процес, що забезпечує рівні поверхні розділу та відсутність забруднень. Ці три шари у поєднанні з житловий утворюють сердечник кабелю. Сердечник кабелю оточений мідним дрітним екраном, котрий захищає кабель під час прокладки, підтримує нульовий потенціал на поверхні кабелю, несе зарядні струми, відводить струми при коротких замиканнях. Зона екрану з мідних дротів забезпечується поздовжній водонепроникністю з допомогою водонабухаючого матеріалу так, щоб вода не могла проникнути в кабель при пошкодженні зовнішньої оболонки. Подвійна герметизація екрану забезпечується алюмінієвою стрічкою з полімерним покриттям, яка зварена з зовнішній поліетиленовою оболонкою. Зовнішня оболонка виконується з зносостійкого світлостабілізованого поліетилену високої щільності, або ПВХ пластикату.

1.2 Компоненти ізоляційного матеріалу

Своїми унікальними властивостями кабелі з ізоляцією із СПЕ завадячують застосовуваному ізоляційному матеріалу. Поліетилен в даний час є одним з найбільш застосовуваних ізоляційних матеріалів при виробництві кабелів. Але спочатку термопластичному поліетилену властиві серйозні недоліки, головним з яких є різке погіршення механічних властивостей при температурах, близьких до температури плавлення. Рішенням цієї проблеми стало застосування пошитого поліетилену.

Термін «зшивка» передбачає обробку поліетилену на молекулярному рівні. Поперечні зв'язки, утворюються в процесі зшивки між макромолекулами поліетилену, створюють тривимірну структуру, яка й визначає високі електричні та механічні характеристики матеріалу, меншу гігроскопічність, більший діапазон робочих температур.

Вихідною сировиною для зшитого поліетилену є поліетилен високої щільності та підвищеною міцності зі звичайною лінійною структурою. Зшивання полягає в тому, що при високих температурі та тиску, а також під впливом опромінення електронами, та при додаванні певних хімічних з'єднань відбувається об'єднання молекулярних ланцюжків поліетилену в єдину тривимірну структуру.

Крім підвищеної ударної міцності та ударній в'язкості, зшитий поліетилен має надзвичайно корисні властивості, недосяжні для інших матеріалів, які визначають основні області його застосування.

При прокладці в землі застосовується оболонка з поліетилену високою щільності, що забезпечує необхідний захист кабелю від механічних пошкоджень, як під час прокладки, так та в процесі експлуатації. Якщо необхідна герметизація екрану, використовується два роздільних шари водоблокуючих стрічок під і поверх мідного екрану, що накладаються із перекриттям. При прокладанні кабелю в кабельних спорудах застосовується оболонка з ПВХ-пластикату зі зниженою горючістю.

Зшитий поліетилен може вироблятися за різними технологіями при змінах температури, тиску при яких проходять реакції, а також супутніх речовин. При цьому отримують матеріали, які дещо відрізняються за своїми властивостями. В електроізоляційній промисловості використовуються:

1. PEХb - поліетилен, «зшитий» хімічним силановим (або силанольним) способом. У його виробництві використовуються речовини кремневодні, які з підвищенням температури до 80-90 ° С беруть участь в гідролізі, пов'язуючи бічні відгалуження полімерних макромолекул. Порівняно дешевий метод, який дає близько 65% зшивки. Був дуже поширений на початковому етапі використання поліетилену. У якості кабельної ізоляція, але давав нерівномірність розподілу властивостей по всьому обсягу.

2. PEХa «зшивається» в присутності перекису водню, через що називається «пероксидним», при підвищенні температури до 400°С і тиску 8-9 атм. Такий метод модифікації поліетилену складніший і більш дорогий, але дає до 80% зшитих молекул і порівняно рівномірний розподіл показників за обсягом матеріалу. Отримав найбільше застосування як високовольтна ізоляція великої товщина.

Ізоляцію PEХb дозволено тільки для кабелів, розрахованих на напруга трохи більше 1 кВ. При більшій напрузі вона має меншу електростійкість, часто дає пробої і швидко приходить у непридатність. Для ізоляції дротів на 10-35 кВ і більше використовується тільки матеріал PEХa.

Ізоляція зі зшитих зразків поліетилену використовується у виробництві одножильного та трижильного кабелю, що застосовуються як в однолінійній, так і в груповий прокладці на відкритих місцях, в кабельних конструкціях, під землею. Товщина ізоляції варіюється від 3,4 до 35 мм при перетені кабелю від 35-ти до 3000 мм² та протіканні струму напругою до 550 кВ.

Вибір матеріалу екрану залежить від того є чи поле, яке впливає на кабельний виріб електричним або магнітним. Узагалом магнітні матеріали забезпечують більше поглинання випромінюваної електромагнітної енергії, а гарні провідники, такі як мідь або алюміній мають високу відбиваючу здатність.

Останні більше ефективно екранують електричні поля, але їх ефективність знижується із збільшенням частоти. У діапазоні низьких частот і гарного екранування магнітних полів можна застосовувати сплави з більшою магнітною проникністю, такі як латунь.

Як матеріал магнітних екранів у слабких полях використовуються сплави із високою магнітною проникністю. Пермалої, що відносяться до групі ковких сплавів з високою магнітною проникністю, добре обробляються різанням і штампуванням. За складом пермалої прийнято ділити на низьконікелеві (40-50% Ni) та високонікелеві (72-80% Ni). Для поліпшення електромагнітних та технологічних властивостей пермалої часто легують молібденом, хромом, кремнієм, кобальтом, міддю і іншими елементами. Основними показниками електромагнітного якості цих сплавів є значення початкової і максимальної магнітної проникності. Коерцитивна сила у пермалоїв має бути якомога менша, а питомий електричний опір ρ і намагніченість насичення як можна більше високими.

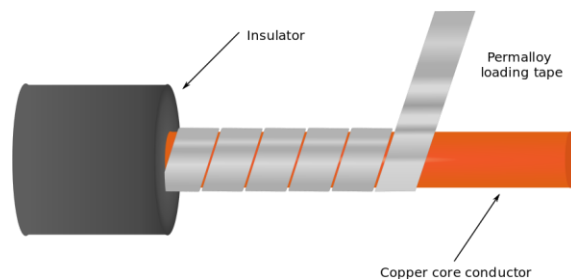


Рисунок 1.4 – Схема екранування кабелю пермалоєм

Низьконікелевий пермалої застосовують для виготовлення магнітних екранів, що працюють у слабких постійних магнітних полях. Легований кремнієм і хромом низьконікелевий пермалої застосовують при підвищених частотах.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНІ МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ ТА КОНТРОЛЮ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ

2.1 Основні методи діагностики та контролю стану ізоляції кабельних ліній з ізоляцією зі зшитого поліетилену

Для забезпечення надійності роботи силових кабелів необхідно проводити їх перевірку перед введенням в експлуатацію. Перевірці можуть піддаватися струмопровідні жили кабелю (для забезпечення з'єднання джерела електричної енергії зі споживачем) і їх ізоляція (для уникнення коротких замикань). При введенні кабельних ліній 6-10 кВ зі пошитою поліетиленовою ізоляцією в експлуатацію можуть проводитися наступні випробування:

- 1) перевірка цілісності і фазування жив кабелю;
- 2) вимірювання опору ізоляції. Величина опору не нормується, вимір опору проводиться до і після випробування підвищеною напругою;
- 3) випробування номінальною або підвищеною напругою випрямленого струму (у деяких випадках проводиться випробування напругою промислової або наднизкої частоти (0,01-0,1 Гц));
- 4) вимірювання розподілу струму по одножильним кабелям. Нерівномірність у розподілі струмів на кабелях не повинна бути більшою 10%;
- 5) контроль стану антикорозійного покриття, при наявності;
- б) вимірювання опору заземлення.

Ізоляційні матеріали в більшою мірою схильні до руйнування під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, тому найбільшу увагу слід приділити випробуванням ізоляції. Нормована перевірка підвищеною напругою є

руйнівною для ізоляції, так як, крім виявлення наявних вад (утворених в процесі виробництва або як слідство неякісного монтажу), прискорюється процес деструкції ізоляційного матеріалу, що веде до появи нових дефектів в ізоляції та скорочення терміну її служби. Крім того, при використанні постійної напруги для випробування кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену, в них може накопичуватися об'ємний заряд, наявність якого може призвести до швидкого виходу з ладу кабелю. У зв'язку з цим в наразі має місце тенденція до впровадження неруйнівних методів контролю і діагностики ізоляції, якими є:

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

2.2 Фізика процесу старіння ізоляції матеріалу

Частковим розрядом називається електричний розряд малої потужності, який шунтує лише частину ізоляції, і не викликає значної зміни напруги між електродами. Як правило, часткові розряди виникають в ізоляції у місцях знаходження внутрішніх дефектів (бульбашок) газів, різних мікрочастинок твердих домішок) через те, що в цих місцях виникає неоднорідність електричного поля, напруженість якого всередині дефекту може бути набагато вищою, ніж у ізоляційному матеріалі.

Як правило, електрична міцність домішок суттєво менше електричної міцності ізоляції, тому в місці дефекту виникає локальний електричний пробій. Джерелами ЧР високої інтенсивності зазвичай є дендрити – древоподібні канали неповного пробою, що розвиваються з неоднорідностей, утворюються в ізоляції

при виготовленні та у процесі експлуатації як наслідок деструкції та/або деполімеризації матеріалу з причин природного старіння ізоляції. Крім того, джерелами ЧР можуть бути місця неякісного монтажу, наприклад, кабельних муфт. У середині дефектів ізоляції, що утворилися як наслідок недоліків технології виготовлення, в процесі експлуатації під впливом електричного поля виникають часткові розряди, які викликають такої, що зростання дендритів. Для заповнених газами дефектів суттєвим є той факт, що для виникнення часткових розрядів в газових включеннях потрібна менша напруженість електричного поля, оскільки діелектрична проникність газів менше, чим проникність рідин і твердих домішок. Як слідство інтенсивність часткових розрядів може бути суттєво вище на початкових стадіях розвитку дефекту. Мікропори в ізоляції можуть бути заповнені водою, наявною в ізоляції у вигляді розчину або проникає в ізоляцію з навколишнього середовища.

До неруйнівних методів контролю стану ізоляції також відносять створення моделей та наступний розрахунок основних параметрів кабелю з обліком умов його експлуатації. Дані методи дозволяють оцінити стан ізоляції кабельного виробу в режимі реального часу, незалежно від терміну його експлуатації. Основним аспектом у постановці та наступному розв'язання завдання прогнозування часу експлуатації до зносу ізоляції полягає в описі фізики перехідних процесів, що відбуваються в ізоляції математичним апаратом або при моделюванні процесу її старіння за допомогою спеціально розроблених програм.

При роботі кабелю в номінальному режимі відбувається поступове погіршення ізоляційних властивостей. Цей процес викликаний як наслідок нелінійної зміни динамічних характеристик, таких як вплив зовнішнього магнітного і електричного поля, перепад температур, механічний вплив, обумовлений динамічними навантаженнями на розтягування і стиск, вплив факторів навколишнього середовища (світло, радіація), вологість, дія інертних газів. На рівні хімічних реакцій, процес впливу зовнішніх впливів на швидкість розпаду молекули можна описати з допомогою закону Арреніуса:

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

де Kt – середня ймовірність розпаду однієї молекули за одиницю часу, змінна відповідає за швидкість хімічних реакцій; K – коефіцієнт, що залежить від матеріалу речовин, які беруть участь у реакції; W_a - енергія активації; k - довідкове значення постійної Больцмана.

Для кращого розуміння цього явища наведено окремий випадок старіння ізоляції в електростатичному полі з високою напруженістю. На окремо взяту ділянку ізоляції впливає електричне поле, внаслідок чого на цій ділянці виникають часткові розряди. Відбувається нелінійне зростання часткових розрядів та при їх періодичному повторенні вони починають процес руйнування ізоляції тому, що в ній з'являються мікротріщини. При досягненні максимально допустимого значення електричної міцності відбувається пробій. Для визначення та розрахунку стану ізоляційного матеріалу виведено закон, що описує механізм утворення та поділ дефектів у діелектричному матеріалі. В якості випробуваного зразка був обраний поліетилен (рис. 2.1).

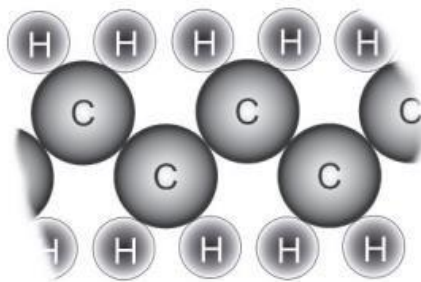


Рисунок 2.1 – Структура молекули поліетилену

У хімічній формулі поліетилену, при пробіі руйнуються зв'язки атома вуглецю з сусідніми атомами вуглецю і утворюються вільні атоми водню, які

можуть стати причиною виникнення бульбашок. Незв'язаний водень, що утворюється, вибивається в якості позитивно зарядженого іона H^+ , який, у свою чергу, сприяє іонізації та подальшому руйнуванню молекулярної структури поліетилену в цілому та згодом, захоплюючи вільний електрон, стає нейтральним, а вуглець стає провідною мікрочастинкою. При цьому сусідні атоми вуглецю утворюють зв'язки між собою.

Крім того, можливий варіант, коли вільний водень утворює зв'язки з сусідніми атомами вуглецю в незруйнованих молекулах і утворює кінцеві групи. При руйнуванні такого зв'язку під впливом електричного поля утворюється вільний водень і кінцева група зсусіднім атомом вуглецю.

Причини старіння в поліетиленової ізоляції неминучі, як технологічні, так і експлуатаційні. До таких дефектів відносяться мікророзмірні повітряні порожнини, сторонні включення, тріщини тощо. Вони з'являються в ізоляції в процесі її виготовлення або прокладки та функціонуванні кабелів внаслідок, наприклад, періодичних стисків та розширення матеріалу в режимах навантаження. Ці мікропорожнечі заповнені газом через виникнення водяної пари та наявності летких продуктів у виробничих процесах зшивки та екструзії ізоляції.

2.3 Опис існуючих моделей для розрахунку ресурсу ізоляції

2.3.1. Спрощена модель ізоляції із поліетилену як зріз розмірами 100×100 молекул CH_2 , в яких може статися пробій під впливом електричне поле.

Уявимо квадрат (100×100) як систему координат, де координати пробією визначаються випадково. Розглядається окремий випадок старіння ізоляції в електричному полі (ЕП) високої напруженості. Під дією ЕП старіння відбувається за рахунок розвитку в ізоляції часткових розрядів. Періодично

повторювані часткові розряди руйнують ізоляцію шляхом появи в ній мікротріщин, що призводить до її пробою. Для визначення ступеня деградації ізоляції, що веде до пробою, використовується закон розподілу появи дефектів в діелектриці (рис. 2.2).

При використанні випадкової функції, вибраної з робочого напруги кабелю на 10 кВ та товщини ізоляції, визначалися координати зруйнованих клітин, і при руйнуванні на одній прямій 10 клітин із 100 вважалось, що стався пробою. Очевидно, що ця модель потребує доопрацюванні. У першу черга, необхідно визначити критерій виникнення пробою ізоляції, то є ступінь руйнування матеріалу по радіусу ізоляції для виникнення пробою. Згідно отриманої залежності основна частина пробоїв ізоляції припадає в проміжку від 300 до 500 пробитих молекул (рис.2.3).

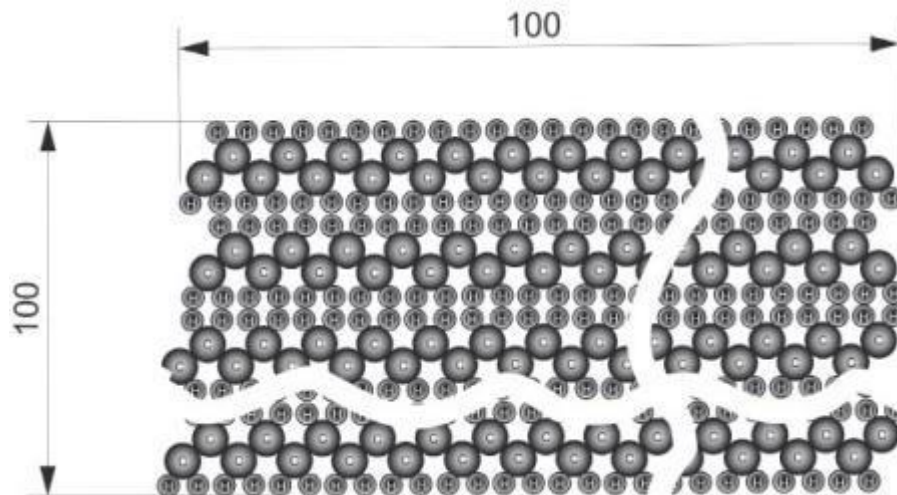


Рисунок 2.2 – Модель ізоляції у вигляді зрізу 100x100 молекул СН

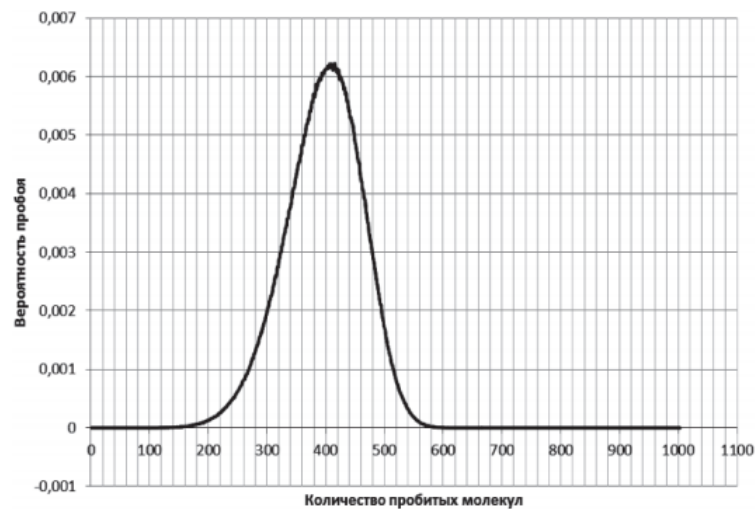


Рисунок 2.3 – Графік залежності ймовірності пробою ділянки ізоляції від кількості пробитих молекул СН

Для розрахунку приймається середнє значення 400 молекул. Розмір поля для розрахунку становить 100×100 клітин, тобто на полі 10 000 молекул. Таким чином, для пробою ізоляції достатньо пробити 4 % молекул, за умови, що при кожному частковому розряді пробиватиметься лише одна молекула, тоді як насправді за один частковий розряд може пробитися більша кількість молекул.

2.3.2. Статистична модель для визначення критичного ступеня руйнування ізоляційного шару. Аналіз цієї моделі показав, що одна з найбільш ймовірних форм виникнення дефекту – еліптична, розподілена за радіусом кабелю тому, що дефекти ізоляції, які призводять до пробою, зазвичай представляють собою дендритні утворення – структурні канали в ізоляції, заповнені рідиною, твердими домішками чи газами. Моделювання різних розмірів дефекту показало значний запас електричної міцності ізоляційного матеріалу. Для виникнення напруженості електричного поля вище за пробивну, прийняту 6 кВ/мм для зістареного кабелю, необхідно зруйнувати близько 78% ізоляції за радіусом, згідно картині електричного поля і розподілу напруженості електричного поля у сфері дефекту (рис. 2.4).

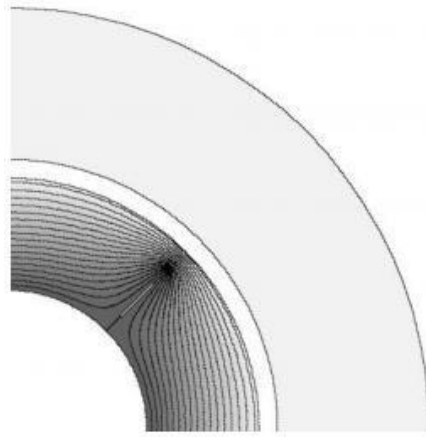


Рисунок 2.4 – Електричне поле кабелю з дендритом

Для виконання розрахунку в трьох вимірах пропонується використовувати паралелепіпед зі сторонами, пропорційними розмірам ізоляції кабелю по довжині, товщині і внутрішньої довжині кола ізоляції. Використання такої форми дозволить врахувати можливість зростання дендриту тільки вздовж радіусу. Для визначення пропорційності сторін необхідно розрахувати розміри кожною з них. Однак для розрахунку необхідно перетворити отриманий паралелепіпед в тривимірний масив елементів для проведення розрахунку. Результати моделювання показали, що густина ймовірності пробою змінюється за законом розподілу Вейбулла, який описується формулою:

$$f = \left(\frac{k}{\chi}\right) \cdot \left(\frac{x}{\chi}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{x}{\chi}\right)^k} \quad (2.2)$$

де k - коефіцієнт форм

Для математичного розрахунку залишкового ресурсу ізоляція кабелів потрібно знати функцію ймовірності пробою в залежності від ступеня руйнування матеріалу. Для розподілу Вейбулла вона має вигляд:

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

Внаслідок моделювання встановлено, що при руйнуванні матеріалу до 35,5% ймовірність пробою становить менше 1%, після чого починає суттєво збільшуватися. Таким чином, при руйнуванні матеріалу до 35,5 % велика ймовірність безвідмовний роботи ізоляції. У області від 35,5% до 78 % ймовірність пробою суттєво зростає, що вказує на можливості частої появи дефектів ізоляції.

3.3.3. Метод визначення кореляційної залежності між характеристиками ізоляції кабелю та характеристиками, прямо пов'язаними з ресурсом кабелів. Основною причиною виходу з ладу кабелів з поліетиленовою (ПЕ) ізоляцією, що знаходяться під тривалим впливом підвищених температур і механічних навантажень (термомеханічне старіння) при робітників напругах, є розтріскування оболонки і ізоляції кабелів. Стійкість до розтріскування кількісно визначається температурою холодостійкості T_x . Різними дослідниками було встановлено, що зменшення ресурсу кабелів із ПЕ ізоляцією в умовах експлуатації T_x ПЕ ізоляції підвищується. Тепловий рух структурних елементів в полімерах і їхня рухливість зумовлює релаксаційні переходи, що вивчаються методами релаксаційної спектроскопії. У першу чергу структурна необхідність проявляється при вивченні температурно-частотних спектрів діелектричних та механічних втрат. Це підтверджено експериментально. Спектри механічних втрат відбивають самі процеси молекулярного руху, як і діелектричні. Для діелектричних спектрів помітні три основних переходи: низькотемпературний γ - максимум діелектричних втрат визначається рухливістю окремих груп макромолекули; β - максимум пов'язаний з сегментальною рухливістю, він знаходиться вище температури склювання полімеру. Експериментально доведено, що γ і β - максимуми знаходяться за негативних температурах по Цельсію і є малоінформативними; α - максимум пов'язаний з сегментальною рухливістю полярних груп по поверхні кристалітів, знаходиться при підвищених температурах і є інформативним. У часі старіння в області α - релаксації відбувається збільшення тангенсу кута діелектричних втрат у максимумі

температурної та частотної залежності і, що найголовніше, відбувається зміщення розташування максимуму $\text{tg}\delta$ на температурних залежностях в область більше високих температур ΔT_M приблизно на 35°C від вихідного стану до повного витрачання ресурсу, а на частотних залежностях – у область низьких частот Δf_M приблизно на 750 Гц. Відхилення розташування $\text{tg}\delta_M$ від вихідного стану ΔT_M або Δf_M є кількісним заходом оцінки процесу старіння. Експериментально встановлено, що міжобраними параметрами - критеріями ΔT_M або Δf_M і загальноприйнятим критерієм - температурою холодостійкості – є пряма кореляційна залежність. Ці залежності (рис.2.5) можна описати лінійними функціями:

- від температури

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

- від частоти прикладеного напруги

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

де T_x температура холодостійкості Кельвіна. При цьому для визначення необхідно від кабелю відрізати зразок та експериментально визначити її величину, тобто. цей метод неприйнятний в експлуатації.

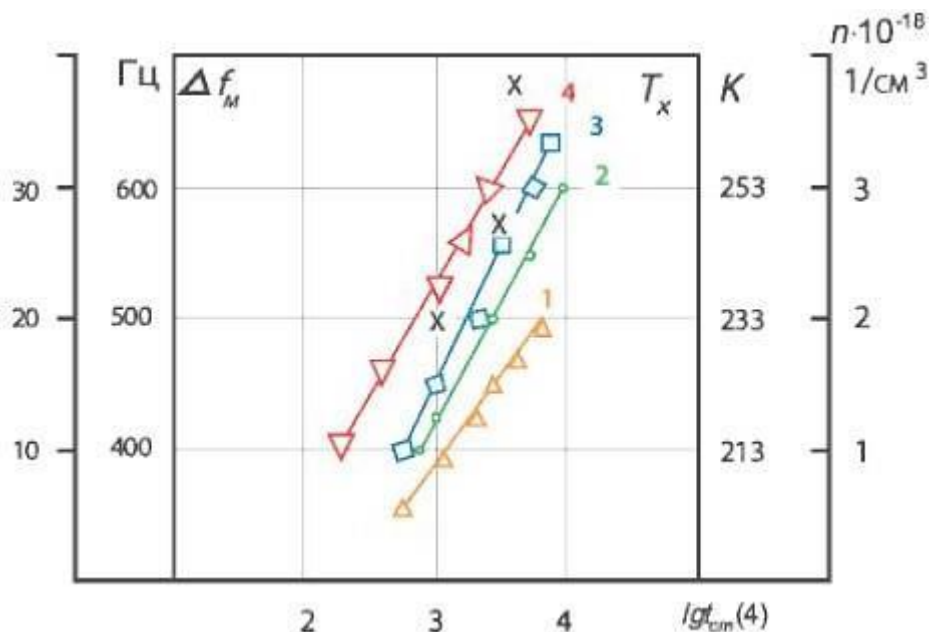


Рисунок 2.5 – Залежності параметрів старіння

При вивченні температурно-частотних спектрів діелектричних втрат експерименти проводяться на відрізках кабелів або КЛ без вилучення зразків, тобто метод є неруйнівним (випробувальна напруга становить 30-50 В, діапазон частот - до 15 кГц, що не може вплинути на ізоляцію в момент випробувань). Вводиться поняття коефіцієнта зміни параметра працездатності від часу старіння:

$$K_n = \frac{P_{\text{пр}} - P_{\text{н}}}{\ln \tau_{\text{пр}} - \ln \tau_{\text{н}}} \quad (2.6)$$

де $P_{\text{пр}}$, $P_{\text{н}}$ - відповідно значення параметра: граничне (вироблений ресурс) та напрацьоване в процесі експерименту;

$\tau_{\text{пр}}$ - граничне значення напрацювання, відповідне $P_{\text{пр}}$;

$\tau_{\text{н}}$ - напрацьований ресурс у момент вимірювання параметра $P_{\text{н}}$.

У відповідності з (2.6) можна, можливо визначити напрацьований ресурс:

$$\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{прф}} \cdot \exp \left[\frac{P_{\text{н}} - P_{\text{пр}}}{K_n} + \frac{W}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{р}}} - \frac{1}{T_{\text{ф}}} \right) \right] \quad (2.7)$$

де $\tau_{\text{прф}}$ - граничне значення ресурсу в форсованому режимі випробувань;

$T_{\text{ф}}$ - температура старіння у форсованому режимі;

$T_{\text{р}}$ - робоча температура кабелю;

W - 54 кДж/моль - умовна енергія активації процесу руйнування ПЕ.

Для використання формули (2.5) необхідно попередньо визначити параметри-критерії працездатності - $\Delta T_{\text{м}}$ і $\Delta f_{\text{м}}$. Вимірювання параметра $\Delta T_{\text{м}}$ необхідно проводити при рівномірному нагріві кабелю, що практично неможливо. Більше зручним параметром є $\Delta f_{\text{м}}$. Був розроблений експрес-метод, що дозволяє визначити параметр $\Delta f_{\text{м}}$, проводячи вимірювання лише на двох частотах. Отримано формула для визначення $f_{\text{м}}$:

$$f_M = \sqrt{f_1 \cdot f_2 \cdot \left(\frac{f_1^\lambda \cdot \operatorname{tg} \delta_1 - f_2^\lambda \operatorname{tg} \delta_2}{f_2^\lambda \operatorname{tg} \delta_2 - f_1^\lambda \cdot \operatorname{tg} \delta_1} \right)^{\frac{1}{\lambda^2}}} \quad (2.8)$$

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

Після визначення f_M обчислюється параметр Δf_M .

2.3.4. Математична модель появи включень.

У ізоляційних матеріалах (ІМ) кабельних ліній електричних мереж є різноманітні неоднорідності в вигляді включень, прошарків між окремими шарами, мікротріщин, відшарування ізоляції тощо. За рахунок перерозподілу електричного поля внаслідок відмінності діелектричної проникності ϵ та питомої провідності γ , тобто $\epsilon_1 \cdot E_1 = \epsilon_2 \cdot E_2$ або $\gamma_1 \cdot E_1 = \gamma_2 \cdot E_2$. У місцях цих неоднорідностей виникає висока локальна напруженість поля. Розвиток розряду в області включення, де має місце висока локальна напруженість поля, викликає неповний пробій ізоляції – ЧР. Для виявлення закономірностей розвитку ЧР в газових включеннях, визначимо характеристики ЧР, беруть участь в руйнуванні ІМ.

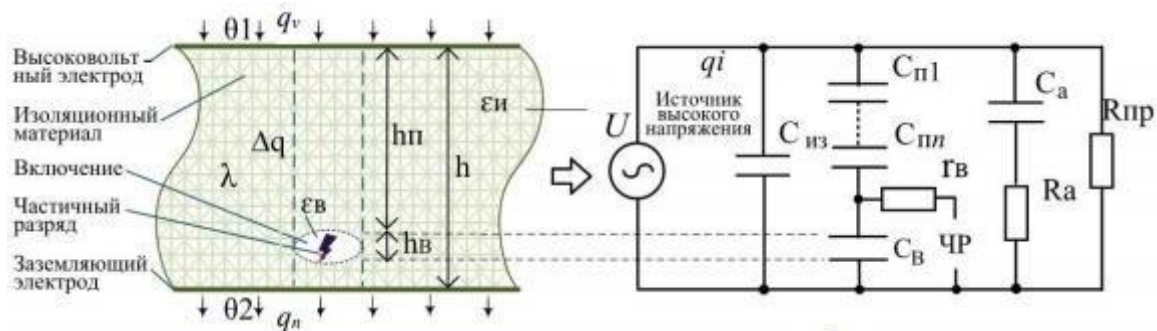


Рисунок 2.6 – Схема розвитку ЧР в ізоляції і еквівалентна електрична схема заміщення в момент виникнення ЧР при включенні

Для дослідження величини області включення процесу розвитку ЧР, а отже, механізмів старіння і електричного пробою ІМ, необхідно визначити параметри ЧР, а саме, встановити зв'язок між напругою виникнення $U_{\text{чр}}$ його максимальною величиною $q_{\text{чр}}$ і завтовшки включення $h_{\text{в}}$. Напруженість електричного поля в газовому включенні перевищує напруженість поля ізоляційного матеріалу, так як його діелектрична проникність значно вища за діелектричну проникності газу ($\epsilon_{\text{повітря}} = 1$). Якщо до ізоляційного матеріалу додано напруга $U = U_m \sin \omega t$, то на газовому включенні напруга буде одно:

$$U_{\text{в}} = U \cdot \frac{C_{\text{п}}}{C_{\text{в}}} \quad (2.9)$$

Напруга, що прикладається, викликає накопичення поверхневого заряду на межі газового включення та решти діелектрика. Коли напруга на включенні досягне напруги початкової іонізації газу, станеться ЧР ємності включення:

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

$$C_{\text{п}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{п}} S_{\text{в}}}{h - h_{\text{в}}}, C_{\text{в}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{\text{п}} S_{\text{в}}}{h_{\text{в}}}$$

де $C_{\text{в}}$ - ємність газового включення; $C_{\text{п1}} - C_{\text{пn}}$ - ємність ізоляції, включеної послідовно з газовим включенням; $r_{\text{в}}$ - опір каналу у газовому включенні; C - ємність решти ізоляції; $R_{\text{а}}$ - опір абсорбції; $R_{\text{пр}}$ - Опір провідності; h - товщина ізоляційного матеріалу; $h_{\text{п}}$ - товщина ізоляції, розташованою послідовно із включенням; $h_{\text{у}}$ - товщина ізоляції включення (розмір включення); λ - теплопровідність; Q_1 і Q_2 - виділене і відведене кількість теплоти має місце при температурах θ_1 та θ_2).

$U_{\text{в.пр}}$ - пробивне напруга газового включення; $S_{\text{у}}$ - площа газового включення.

Після підстановки $C_{\text{в}}$, $C_{\text{п}}$ в з урахуванням, що $h_{\text{у}} \ll h$ і неоднорідності електричного поля ізоляції, отримаємо:

$$U_{\text{чр}} = \frac{U_{\text{в.пр}}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\varepsilon_{\text{п}}}{\varepsilon_{\text{в}}} \cdot \frac{h}{\delta K_{\text{п}}} \quad (2.11)$$

де $K_{\text{п}} = E_{\text{макс}} / E_{\text{ср}}$ – коефіцієнт неоднорідності електричного поля в ізоляції, що дорівнює відношенню максимальної напруженості $E_{\text{макс}}$ до середньої напруги $E_{\text{ср}}$ в ізоляційному проміжку. Ізоляційний матеріал має товщину включення $h_{\text{в}}$, діелектричну товщину h і діелектричну проникність ізоляційного матеріалу $\varepsilon_{\text{і}} = \varepsilon_{\text{п}}$, де $h_{\text{в}} \ll h$ при робочій напрузі U , напруга на включенні:

$$U_{\text{в}} = \varepsilon_{\text{п}} \frac{h_{\text{в}}}{h} \cdot U \quad (2.12)$$

Чим більше напруга $U_{\text{чр}}$, тим вище допустиме для ізоляції тривала діюча робоча напруга. Зростання прикладеної напруги веде до лінійного зростання рівня ЧР, а також до зниження порога їх виникнення. При певній напрузі $U_{\text{кр}}$ – напруга критичних ЧР, $\eta_{\text{чр}}$ – інтенсивність ЧР різко зростає, що призводить до стрімкого руйнування ізоляції та зниження терміну служби.

2.4 Аналіз впливів, наданих зовнішніми і внутрішніми факторами на ізоляцію кабелів в процесі експлуатації

В процесі експлуатації кабельних ліній електропередачі з ізоляцією із зшитого поліетилену ізоляційний матеріал може піддаватися ряду зовнішніх і внутрішніх руйнівних впливів, що приводять до його старіння:

1. Температурний вплив визначає швидкість протікання хімічних реакцій деструкції і деполімеризації зшитого поліетилену;

2. Підвищена вологість довкілля може викликати зволоження ізоляції та погіршувати її властивості. Для визначення ступеня зволоженості визначається коефіцієнт абсорбції, та виконують сушку ізоляції. Крім того, вміст води в

мікропорах ізоляційного матеріалу викликає явище водного триінгу, який прискорює розвиток дефектів в ізоляції ;

Ультрафіолетове випромінювання надає руйнівний вплив на

3. поверхню ізоляції, так як фотони ультрафіолетового діапазону мають високу енергію і руйнують молекулярну структуру ізоляції (відщеплюють бічні групи, частіше водень) на її поверхні, призводять до підвищення твердості ізоляції, її висушування, розтріскування та, таким чином, до погіршення ізоляційних властивостей. Це явище ще називають фотохімічної деструкцією.

4. Хімічні впливи проявляються в різноманітті хімічних речовин, які можуть вплинути на ізоляцію і руйнувати її, наприклад, азотну кислоту, здатну руйнувати поліетилен в 50% розчині, або наявність кисню з повітря, що приводить до термоокислювальної деструкції;

5. Механічні впливи викликають руйнування міжатомних зв'язків при виникненні механічної напруги вище енергії зв'язків атомів;

6. Дія радіації на діелектрик може привести до різних ушкоджень на молекулярному рівні. Відбувається зміна структури, властивостей, стан речовини. Носії заряду, що утворюються в опромінюваній речовині, створюють стаціонарні і нестаціонарні струми і викликають накопичення об'ємного заряду в діелектриках, який може зберігатися на протязі тривалого часу.

Проте розробка системи моніторингу всіх перерахованих факторів є достатньо складним завданням з огляду необхідності глибокого вивчення природи всіх перерахованих впливів на ізоляції. Крім того, потрібен індивідуальний підхід до моніторингу залишкового ресурсу кожного конкретного кабелю, так як вплив деяких факторів на ізоляцію може бути незначним і, відповідно, їм можна знехтувати.

Виходячи з конструкції обраного раніше кабелю, вирішено не враховувати наступні фактори руйнування ізоляційного матеріалу:

1. Вологість навколишнього середовища тому, що в кабелі є водоблокуючі стрічки, які перешкоджають зволоженню кабелів, а також відомо, що поліетилен має відносно низьке вологопоглинання;

2. Ультрафіолетове випромінювання, так як він надає руйнівний вплив виключно на поверхню кабелю, тобто на його оболонку, не пошкоджуючи при цьому робочу ізоляцію, розташовану в кабелі так, що вона захищена від впливу зовнішнього сонячного випромінювання;

3. Хімічні дії вирішено не розглядати окремо, оскільки всі хімічні речовини можуть бути в середині ізоляції у невеликій кількості або утворюватися в результаті руйнування ізоляційного матеріалу, отже, будуть визначатися процесами термічною деструкції, викликані нагріванням струмопровідної жили в режимі експлуатації кабелю;

4. Механічні впливи виявляються в вигинах (при прокладці), стисненнях і розтягуваннях кабелів, викликаних перепадами температури і зміщенням ґрунту (при прокладці в землі);

5. Радіація впливає на діелектрик тільки на спеціалізованих об'єктах, наприклад, на АЕС, однак метою дослідження є розробка системи визначення залишкового ресурсу для кабелів загального призначення, які використовуються в промисловості.

Таким чином, виходячи з аналізу конструкції кабелів та впливів, якими їх ізоляція може піддаватися, достатньо враховувати у процесі старіння впливи температури і часткових розрядів, викликаних наявністю електричного поля високою напруги.

2.5 Розробка математичної моделі для прогнозування залишкового ресурсу

За основу розрахунку залишкового ресурсу було взято існуючу модель старіння ізоляції в спрощеному вигляді:

$$\tau_{сл} = AE^{-n} \exp \cdot \frac{W_a}{kT} \quad (2.13)$$

Згідно з наведеними вище висновками, термін служби ізоляції визначається потужністю часткових розрядів і швидкістю хімічних реакцій при термічній та термоокислювальній деструкції ізоляційного матеріалу, що визначається законом З. А. Арреніусу.

Подання формули з обліком ймовірності пробою ізоляції:

$$\tau_{сл} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)} \quad (2.14)$$

де N_t - кількість молекул речовини в одиниці об'єму в даний момент часу, N_0 - кількість молекул речовини в одиниці об'єму до початку руйнування, прийнято $N_t / N_0 = 0,645$, B - константа, E - напруженість електричного поля, n - показник ступеня, залежить від типу і структури матеріалу, $K_t(T) = K_0 \cdot e(-W_a/kT)$ - коефіцієнт швидкості хімічних реакцій при температурі в даний момент часу, K_0 - константа швидкості реакції закону Арреніуса, W_a - енергія активації, k - Постійна Больцмана, T - температура в Кельвінах, c - помножуючий коефіцієнт, що визначається певним синергізмом впливу температури і електричного поля.

При цьому для розрахунку залишкового ресурсу необхідно проводити розрахунок кількості незруйнованих молекул матеріалу в заданому обсязі речовини з метою визначення ступеня його деградації. Кількість незруйнованих молекул в даний момент часу при незмінних напруженості і температурі буде розраховуватися за формулою:

$$N_t = N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)} \quad (2.15)$$

Враховуючи умову, що з часом напруженість електричного поля і температура, як правило, хаотично змінюються в умовах експлуатації, необхідно виконувати розрахунок з розбивкою за часом (наприклад, один раз за секунду).

Враховуючи, що функції зміни напруженості і температури хаотичні, пропонується виробляти розрахунок за формулою:(2.16)

$$N_t(t) = N_0 - \int_0^t v(t) dt \quad (2.16)$$

де $v(t)$ - функція швидкості руйнування матеріалу під сукупним впливом факторів, руйнівних ізоляцію, яку можна, можливо визначити за формулою:

$$v(t) = -\frac{dN}{dT} = c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \cdot N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right)} \quad (2.17)$$

Далі, для вирішення завдання прогнозування зносу ізоляції, потрібно зробити екстраполяцію функції $N_t(t)$ за даними, накопиченими на протязі певного часу. Враховуючи циклічність процесів, що відбуваються в електроенергетичної системі, передбачається, що функція збереже експонентний характер.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО КАБЕЛЮ ІЗ ПЛАСТМАСОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

3.1 Електричний розрахунок

Вибір номінального перерізу та основних геометричних параметрів ТПЗ По завданням потрібно спроектувати кабельну лінію для передачі потужності $P=250\text{МВА}$ на напруг $U_n = 20 \text{ кВ}$.

Фазний струм при заданих напрузі і потужності:

$$I_{\phi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos\varphi} = \frac{250 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,96} = 7,518 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.1)$$

Номінальний переріз жили S_n рораховується виходячи з економічної щільності струму:

$$S_n = \frac{I_{\phi}}{J_s} = \frac{7,518 \cdot 10^3}{3,1} = 2425 \text{ мм}^2 \quad (3.2)$$

де $J_e = 3,1 \text{ А / мм}^2$ для мідної жили - Економічна щільність струму (при тривалості роботи кабелю більше 3000-5000 год).

За СОУ-Н МЕН 40.1-37471933-49:2011 "Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ" найбільший переріз жили 1000 мм^2 . Тому, для можливості спроектувати кабельну лінію, для передачі заданої потужності, розділимо передане навантаження по двом паралельним лініям, як показано на рисунку 3.1.

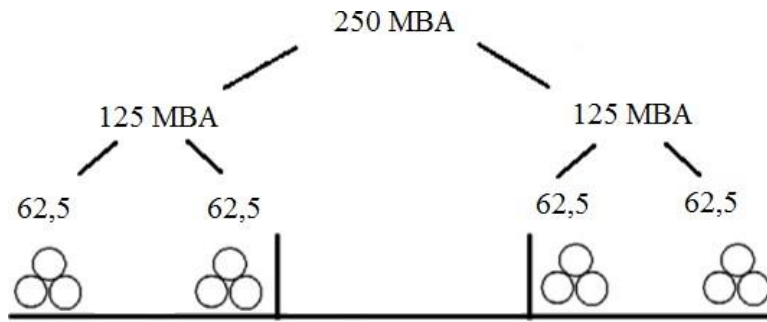


Рисунок 3.1 – Поділ навантаження на дві лінії

Розщеплюємо фазу на дві кабельні лінії, в якій будуть чотири кабелі на номінальну потужність 62,5 МВА. З урахуванням перерозподілу навантаження 62,5 МВА на дві фази перераховуємо фазовий струм для одного кабелю.

$$I_{\Phi} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot \cos\varphi} = \frac{62,5 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0,96} = 1,879 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (3.3)$$

Номінальна переріз жили:

$$S_{\pi} = \frac{I_{\Phi}}{J_s} = \frac{1,879 \cdot 10^3}{3,1} = 606,257 \text{ мм}^2 \quad (3.4)$$

За СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 "Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ" обираємо номінальне переріз жили 630 мм²

Переріз екрану було обрано в відповідно до СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 "Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ". Номінальний переріз мідного екрану в одножильних кабелях та трижильних кабелях з секторними жилами та сумарний переріз мідних екранів, накладених на кожную ізольовану круглу жилу в трижильних кабелях має бути не менше 16 мм² для кабелів з жилами номінальним перерізом 16-120 мм² не менше 25мм² - для кабелів з жилами номінальним перетином 150-300 мм² і не менше 35 мм² - для кабелів з жилою номінальним перетином 400 мм² і більше. Отже обираємо

екран 35мм². Основні технічні характеристики наведено в табл. 3.1.

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

Вид кліматичного виконання:	У
Категорія розміщення:	ПУЕ
Клас пожежник небезпеки:	ПУЕ
Номінальна робоча частота, Гц	50
Діапазон робітників температур	від -50 до +50 градусів Цельсія.
Максимальна допустима температура жили	довго до 90 °С в аварійному режимі 105 °С в режимі КЗ - 250 °С
Гранично-допустима температура екрану в режимі короткого замикання, до 5 сек:	350 °С
Тривалість роботи кабелю в режимі перевантаження, не більше, год : в рік (за весь термін служби)	100 (1000)
Кабель може бути прокладений без попереднього підігріву при температурі, не нижче:	мінус 15 °С
Мінімальний радіус вигину (або при використанні спец шаблонів) не менше, зовнішніх діаметрів	15 (7,5)

По конструкції жила належить до 2 класу гнучкості. Для прийнятого ущільненого перерізу мідних жил по ДСТУ EN 60228:2015 мінімальне кількість дротів у жилі = 53. Вибираємо систему нормальну систему скручування (Усе дроту одного діаметра) правильна (повивна) скрутка з 5 дротоми у центрі, $N = 5 + 11 + 17 + 23 = 56$ що відповідає 5-ій формі скручування з кількістю повивів рівним 4.

Переріз одного дроту:

$$S_{np} = \frac{S_n}{N} = \frac{630}{56} = 11,25 \text{ мм}^2 \quad (3.5)$$

Діаметр дроту:

$$d_{np} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{np}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11,25}{3,14}} = 3,785 \text{ мм} \quad (3.6)$$

Діаметр скрученою жили:

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

Коефіцієнт заповнення жили:

$$f = \left[\frac{(3n + 2)n}{(2n + 0,7)^2} \right] = \left[\frac{(3 \cdot 4 + 2) \cdot 4}{(2 \cdot 4 + 0,7)^2} \right] = 0,74 \quad (3.7)$$

Приймаємо кратність кроку скрутки по кожному повиву

$$m_2 = 18; m_3 = 16; m_4 = 15.$$

Діаметр по кожному повиву:

$$\begin{aligned} D_1 &= (2n + 0,7)d_{np} = (2 \cdot 1 + 0,7) \cdot 4,265 = 10,22 \text{ мм}^2 \\ D_2 &= (2n + 0,7)d_{np} = (2 \cdot 2 + 0,7) \cdot 4,265 = 17,79 \text{ мм}^2 \\ D_3 &= (2n + 0,7)d_{np} = (2 \cdot 3 + 0,7) \cdot 4,265 = 25,36 \text{ мм}^2 \\ D_4 &= D_{ж} = 32,929 \text{ мм}^2 \end{aligned} \quad (3.8)$$

Коефіцієнт укрутки кожного повива:

$$\begin{aligned}
 k_{y2} &= \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{m^2}} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{18^2}} = 1,015 \\
 k_{y3} &= \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{16^2}} = 1,019 \\
 k_{y4} &= \sqrt{1 + \frac{3,14^2}{15^2}} = 1,022
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Загальний коефіцієнт укрутки:

$$k_{y.об} = \frac{5 + 11 \cdot 1,015 + 17 \cdot 1,019 + 23 \cdot 1,022}{5 + 11 + 17 + 23} = 1,021 \tag{3.10}$$

Приймаємо коефіцієнт ущільнення (η) рівний 0,9 (Ущільнення будемо виконувати по зовнішньому діаметру).

Переріз ущільненої жили дорівнює:

$$S_y = \frac{S_n}{\eta} = \frac{630}{0,9} = 700 \text{ мм}^2 \tag{3.11}$$

Діаметр ущільненої жили дорівнює:

$$D_{ж} = \sqrt{\frac{4 \cdot S_y}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 700}{3,14}} = 29,86 \text{ мм} \tag{3.12}$$

За ПУЕ мінімальний та максимальний діаметри круглих багатодротяних ущільнених жил з міді становить для переріз 630 мм² 28,7-32,5 мм (табл. 3.2)

Таблиця 3.2 – Діаметри круглих багатодротяних ущільнених жил з міді

Номінальний переріз, мм ²	Діаметр великих багатодровових ущільнених 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	17,6	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

Вибір товщини екрану струмопровідної жили. У силових кабелях екрани використовуються для вирівнювання напруженості електричного поля. Вони дозволяють краще шунтувати мікротріщини та інші дефекти у поверхні жил.

Екран з електропровідного зшитого поліетилену, що накладається на струмопровідну жилу, згладжує нерівності на її поверхні, сприяючи утворенню радіального електричного поля в товщині ізоляції.

Зверху кожної струмопровідної жили кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену має бути екструдований екран з електропровідної зшитий полімерної композиції завтовшки $(0,6 \pm 0,3)$ мм. Для кабелів з круглими струмопровідними жилами номінальним перерізом 300 мм і більше і для кабелів з струмопровідними жилами секторної форми номінальним перетином 95-400

товщина екструдованого електропровідного екрану повинна має бути $(0,9 \pm 0,3)$ мм.

Прийmemo товщину екрану по жиле:

$$\Delta_{\text{еж}} = 1 \text{ мм} .$$

Розрахунок електричної ізоляції кабелю. Товщина ізоляції для кабелів з пластмасовий ізоляцією на середнянапруга розраховується виходячи з середньої напруженості електричного поля. Для зшитого поліетилену для $U_{\text{ном}} = 20 \text{ кВ}$, середня напруженість електричного поля в ізоляції $E_{\text{ср}} = 2,3 \text{ кВ/мм}^2$.

Товщина ізоляції на фазну напругу:

$$U_{\text{р.пер.}} = \frac{U_{\phi}}{E_{\text{ср}}} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 2,3} = 5,02 \text{ мм} \quad (3.13)$$

Відповідно до таблиці 3.3 для кабелю з ізоляцією з пошитого поліетилену напругою 20 кВ приймаємо значення товщини ізоляції, що дорівнює $\Delta_{\text{вим}} = 5,5 \text{ мм}$.

Таблиця 3.3 – Номінальна товщина ізоляції в залежності від перерізу жили

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

Діаметр і радіус екранованою жили:

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

$$(3.14) \text{ Діаг } r_{\text{эж}} = \frac{D_{\text{эж}}}{2} = \frac{31,854}{2} = 15,927 \text{ мм}$$

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

$$D_{\text{із}} = 2 \cdot R_{\text{із}} = 2 \cdot 21,427 = 42,854 \text{ мм.} \quad (3.15)$$

Розрахункова максимальна напруженість електричного поля:

$$E_{\text{max}} = \frac{U_{\text{н}}}{r_{\text{эж}} \cdot \ln\left(\frac{R_{\text{из}}}{r_{\text{эж}}}\right)} = \frac{20 \cdot 10^3}{15,927 \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right)} = 4,233 \cdot 10^3 \text{ В / мм} \quad (3.16)$$

У відповідності до рівень пробивний напруженості у електропровідного екрану поверх струмопровідної жили після електрохімічного старіння кабелів з ізоляцією з пошитого поліетилену в воді повинен бути не менше 23 кВ/мм, а розмір водного триінгу - трохи більше 500 мкм. Значення пробивної напруженості біля екрану жили кабелів виконання "нг(...)-LS", "н г(...)- HF" повинні бути вказані в технічних умовах на конкретних кабелі марок.

По СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 поверх ізоляції зі зшитого поліетилену повинен бути екструдований екран з електропровідної зшитої полімерної композиції завтовшки $(0,6 \pm 0,3 \text{ мм})$. Приймаємо товщину екрану по ізоляції 0,6мм.

$$\Delta_{\text{ei}} = 0,6 \text{ мм}$$

Діаметр і радіус ізолювані жили з екраном:

$$R_{\text{ei}} = R_{\text{з}} + \Delta_{\text{ei}} = 21,427 + 0,6 = 22,027 \text{ мм};$$

$$D_{\text{ei}} = 2 \cdot R = 2 \cdot 22,027 = 44,054 \text{ мм.} \quad (3.17)$$

Оцінка слабких місць. У кабельних виробках з пластмасовою ізоляцією можуть утворюватися повітряні включення різних форм і розмірів. Мінімальне значення електричної міцності ізоляції визначається міцністю слабких місць, до яких відносяться повітряні включення. Електрична міцність включень пов'язана з їх геометричними розмірами і внутрішнім тиском. Для оцінки слабких місць виконаємо розрахунок напруженості електричного поля, що виникає в повітряній порі певного розміру і в певною товщині ізоляції.

Напруженість всередині включення розраховується за формулою:

$$E_{\varepsilon} = \frac{U_n}{r_{\varepsilon} \cdot \varepsilon_{\varepsilon} \cdot \left[\frac{1}{\varepsilon_{\delta}} \cdot \ln\left(\frac{r_{\varepsilon}}{r_{ж}}\right) + \frac{1}{\varepsilon_{\varepsilon}} \cdot \ln\left(\frac{r_{\varepsilon} + \Delta_{\varepsilon}}{r_{\varepsilon}}\right) + \frac{1}{\varepsilon_{\delta}} \cdot \ln\left(\frac{R_{из}}{r_{\varepsilon} + \Delta_{\varepsilon}}\right) \right]} \quad (3.18)$$

де $\varepsilon_{\varepsilon} = 1.00057$ – діелектрична проникність повітря, $\varepsilon_{\delta} = 2.28$ – діелектрична проникність ПЕ.

Товщина пор:

$$\Delta_{\varepsilon 1} = 0,06 \text{ мм}, \quad \Delta_{\varepsilon 2} = 0,2 \text{ мм}, \quad \Delta_{\varepsilon 3} = 1 \text{ мм}, \quad \Delta_{\varepsilon 4} = 4 \text{ мм}.$$

Відстань до пори:

$$\begin{aligned} r_{в1} &= \frac{U_{эж}}{2} = 15,061; \\ r_{в2} &= r_{в1} + 4 = 19,061; \\ r_{в3} &= r_{в2} + 4 = 23,061; \\ r_{в4} &= \frac{D_{из}}{2} = 20,561 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Перевіряємо зміну напруженості в залежності від розміру повітряного включення при постійній відстані повітряної пори в просторі ізоляції.

Таблиця 3.4 – Електрична міцність повітря при товщині пори

Е прв, МВ/мм	3.6	4.5	5.3	5.9	7.4	10.7	12,5
Δв, мм	4	1	0,6	0,5	0,2	0,08	0,06

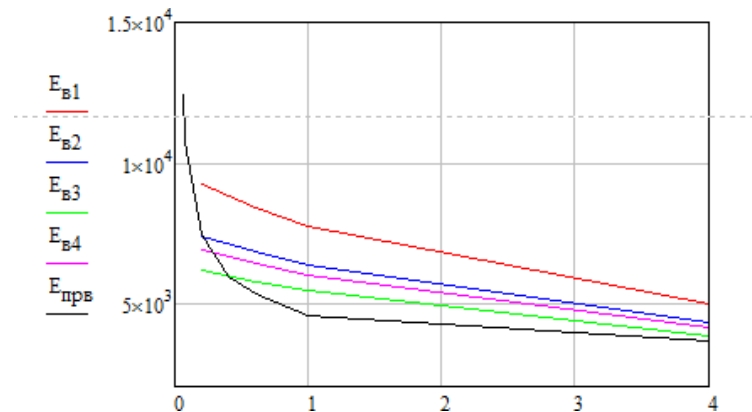


Рисунок 3.2 – Графіки зміни напруженості в повітряній порі в залежності від товщини пори та відстані до неї

З отриманих графіків (рис.3.2) видно що при товщині пори $\Delta > 0,5$ мм напруженість в поля в порі стає вище електричної міцності повітря, що веде до пробою ізоляції. При виробництві кабелю товщина повітряних включень в ізоляції не повинна перевищувати 0,5мм.

Вибір екрану по ізоляції і кабельної оболонки.Для зручності розрахунку наведемо конструктивні елементи для даного кабелю.

Поверх електропровідного екрану ізоляції зі зшитої полімерної композиції жил одножильних та трижильних кабелів з жилами круглої форми, а також поверх сердечника кабелів з секторними жилами з ізоляцією зі зшитого поліетилену має бути накладений обмоткою шар товщиною не менше 0,2 мм зі стрічки або стрічок електропровідного паперу або електропровідної синтетичної стрічки.

$$\Delta_{л.1} = 0,2 \text{ мм} .$$

Діаметр і радіус по першому роздільному шару:

$$R_{u1} = R_{ei} + \Delta_{л1} = 22,027 + 0,2 = 22,227 \text{ мм} \quad (3.20)$$

$$D_{u1} = 2 \cdot R_{u1} = 2 \cdot 22,227 = 44,454 \text{ мм}$$

Повівши з мідних дротів номінальним діаметром 0,7-2,0 мм, поверх яких спіралью накладена мідна стрічка завтовшки не менше 0,1 мм і шириною не менше 8 мм.

Далі накладаємо екран з мідних дротів, скріплених мідний стрічкою. За СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 діаметр дротів має бути 0,7 – 2,0 мм. Поверх мідних дротів спіралью накладається мідна стрічка номінальною завтовшки не менше 0,1 мм і шириною не менше 8 мм в стик .

Прийmemo діаметр дроту 1 мм і товщину стрічки 0,5 мм. Радіус та діаметр кабелю буде:

$$R_e = R_{з1} + d_{np} + \Delta_{л} = 22,227 + 1 + 0,5 = 23,727 \text{ мм} \quad (3.21)$$

$$D_e = 2 \cdot R_e = 2 \cdot 23,727 = 47,454 \text{ мм}$$

Щоб оболонка не прилипала до мідному екрану, поверх стрічки накладається розділовий шар із склострічки номінальною товщиною 0,2 мм.

$$R_{з2} = R_e + \Delta_{ст2} = 23,727 + 0,2 = 23,927 \text{ мм} \quad (3.22)$$

$$D_{з2} = 2 \cdot R_{з2} = 2 \cdot 23,927 = 47,854 \text{ мм}$$

Внутрішня оболонка - з полівінілхлоридного пластикату зниженою пожежонебезпеки. Приймаємо товщину оболонки 1,8 мм.

$$R_{с3} = R_{ст2} + \Delta_{лн} = 23,927 + 1,8 = 25,727 \text{ мм} \quad (3.23)$$

$$D_{с3} = 2 \cdot R_{с3} = 2 \cdot 25,727 = 51,454 \text{ мм}$$

Поверх внутрішньої оболонки накладається термічний бар'єр з двох склострічок номінальною товщиною 0,2 мм.

$$R_{с4} = R_{с3} + 2\Delta_{тер} = 25,727 + 2 \cdot 0,2 = 26,127 \text{ мм} \quad (3.24)$$

$$D_{с4} = 2 \cdot R_{с4} = 2 \cdot 26,127 = 52,254 \text{ мм}$$

Останнім етапом є накладення зовнішньої оболонки з полівінілхлоридного пластикату зниженою пожежонебезпеки і низькою токсичністю продуктів при горінні і тлінні. За СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 номінальна товщина, при цьому діаметрі дорівнює 2,9мм.

Таблиця 3.5 - Значення товщин оболонки

Діаметр кабелю під зовнішньою оболонкою	Номінальна товщина зовнішньою оболонкою
До 40 вмикань	2,5
Від 40 до 50	2,7
Від 50 до 60	2,9
Більше 60	3,5

$$R_{\text{до}} = R_{\text{сл4}} + \Delta_{\text{про}} = 26,127 + 2,9 = 29,027 \text{ мм} \quad (3.25)$$

$$D_{\text{до}} = 2 \cdot R_{\text{до}} = 2 \cdot 29,027 = 58,054 \text{ мм}$$

За результатами розрахунків можна побачити, що значення діаметра кабелю під зовнішньою оболонкою зійшлося зі значеннями за СОУ, а саме увійшло в проміжок 50-60 мм, яка для номінальної товщини зовнішньої оболонки дорівнює 2,9 мм. Виходячи з цього можна зробити висновок, що розрахунок зроблено вірно.

3.2 Тепловий розрахунок

Розрахунок електричних характеристик. Електричними характеристиками силових кабелів є:

- Опір струмопровідної жили (ОПЖ);
- Опір ізоляції;
- Ємність ізоляції;

Розрахунок характеристик полягає у визначенні опору жили, ізоляції та ємності кабелю в робітничому діапазоні температур.

Розрахунок опору струмопровідної жили. Основним джерелом тепла є ОПЖ

Знайдемо опір ОПЖ постійному струму при 15 °С :

$$R_{ж0} = \rho_{Cu} \cdot \frac{1}{S_n \cdot 10^{-6}} \cdot k_y = 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{630 \cdot 10^{-6}} \cdot 1,017 = 2,778 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}, \quad (3.26)$$

де $\rho_{ош}$ - питомий опір матеріалу жили ($\rho_{пo} = 1,724 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) ;

k_{yob} - загальний коефіцієнт укрутки.

Відповідно до СОУ електричне опір для перерізу 630 мм² не має перевищувати 0,153 Ом.

Опір СПЕ постійному струму при робочій температурі:

$$R_T = R_{ж0} \cdot [1 + \alpha_{Cu} \cdot (t_{max} - 20)] = 2,778 \cdot 10^{-5} \cdot [1 + 0,0039 \cdot (90 - 20)] = 3,536 \cdot 10^{-5} \text{ Ом},$$

де α_t - температурний коефіцієнт міді ($\alpha_t = 0,0039 \text{ C}^{-1}$);

t_{max} - тривало допустима температура нагріву жил (90 °С).

Збільшення опору струмопровідної жили на змінному струмі в порівнянні з опором на постійному при робочій температурі буде рівним:

$$R_T = R_{T-} \cdot (1 + y_n + y_\delta)$$

де y_n , y_δ - коефіцієнти, що характеризують збільшення опору жили через поверхневий ефект і ефект близькості. Дані коефіцієнти враховують форму, розміри, конструкцію і взаємне розташування СПЕ.

Отже, далі знаходимо опір жили з урахуванням ефекту близькості та поверхневий ефект.

Для промислової частоти параметр x визначається як:

$$x_n = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{k_n}{R_{ж0}}} = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{1}{2,778 \cdot 10^{-5}}} = 2,133 \quad (3.26)$$

де k_n - коефіцієнт залежить від конструкції жили, і для круглий багатодротовою жили дорівнює 1.

Поверхневий ефект (Витиснення напруженості поля жили кабелю за рахунок електромагнітного поля фази) знаходиться за формулою:

$$y_n = \frac{x_n^4}{192 + 0,8 \cdot x_n^4} = \frac{2,133^4}{192 + 0,8 \cdot 2,12^4} = 0,182 \quad (3.27)$$

Ефект близькості (вплив електромагнітного поля фаз кабелю друг на друга), знаходиться з співвідношення:

$$y_{\delta} \rightarrow y_n^I \rightarrow x \rightarrow k$$

Для розташування одножильного кабелю трикутником, вираз коефіцієнта близькості буде виглядати наступним чином:

$$\begin{aligned} y_{\delta} &= y_n \cdot \left(\frac{D_{\text{эжк}}}{a}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{D_{\text{эжк}}}{a}\right)^2 + \frac{1,18}{0,27}\right] = \\ &= 0,182 \cdot \left(\frac{35,63}{101,442}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{35,63}{101,442}\right)^2 + \frac{1,18}{y_{n2} + 0,27}\right] = 0,052 \end{aligned} \quad (3.28)$$

де a - відстань між центрами сусідніх жил, рівна діаметру кабелю.

Знайдемо коефіцієнт y_n^t , який враховує ефект близькості.

$$x_{\delta} = 0,01124 \sqrt{\frac{k_{\delta}}{R_{\text{ж0}}}} = 0,01124 \cdot \sqrt{\frac{0,8}{0,0016}} = 2,11 \quad (3.29)$$

де k_{δ} - коефіцієнт, який залежить від конструкції жили, і для круглої багатодротової жили для ефекту близькості дорівнює 0,8.

Опір жили з рахунком коефіцієнта поблизу та поверхневого ефекту буде дорівнює:

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

Розрахунок опору ізоляції.

Опір ізоляції для одножильного кабелю змінного струму при кімнатній температурі:

$$R_{ИЗ} = \frac{\rho_v \cdot 10^{-9}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{ИЗ}}{r_{эжс}}\right) = \frac{10^{15} \cdot 10^{-9}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right) = 4,721 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{км} \quad (3.31)$$

де $\rho_v = 10^{15}$ - питомий опір матеріалу ізоляції (зшитого поліетилену).

Опір одножильного кабелю змінного струму при робочій температурі:

$$R_{ИЗt} = \frac{\rho_v \cdot e^{-\alpha_{иt} t_p} \cdot 10^{-9}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{ИЗ}}{r_{эжс}}\right) = \frac{10^{15} \cdot e^{-0,016 \cdot 90} \cdot 10^{-9}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right) = 1,119 \cdot 10^4 \text{ МОм} \cdot \text{км}$$

де $\alpha_{иt}$ - температурний коефіцієнт ізоляції;

t_{\max} – тривала допустима температура нагріву жил (90^0 C).

Розрахунок робочої ємності.

Електрична ємність ізоляції є також важливою характеристикою ізоляції. Залежить від геометричних розмірів кабелю, кількості та форми струмопровідних жил. Розмір робочої ємності пов'язані з однорідністю ізоляції, стабільністю її радіальних розмірів по периметру та довжині, а в період експлуатації – від інтенсивності процесів старіння. Для великого ряду кабелів ємність є стабільністю технологічних процесів.

Електрична ємність ізоляції для одножильного кабелю з однорідний ізоляцією:

$$C = \frac{\epsilon_{иэ} \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln\left(\frac{R_{ИЗ}}{r_{эжс}}\right)} = \frac{2,5 \cdot 10^{-9}}{18 \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right)} = 4,682 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} \cdot \text{м}, \quad (3.32)$$

де $\epsilon_{иэ} = 2.5$ - діелектрична проникність зшитого поліетилену.

Тепловий розрахунок.

При передачі по кабелю електромагнітної енергії, що характеризується досить великою потужністю через втрати енергії в жиле, ізоляції, оболонках, в кабелі виділяється тепло, і його елементи нагріваються. Для уникнення перегріву

кабелю понад допустимих норм виконують тепловий розрахунок, який дозволяє визначити для обраної конструкції кабелю і заданих умов експлуатації максимально припустиме навантаження.

Навантаження силових кабелів залежить від допустимої температури нагрівання СПЕ, а також умов тепловідведення. Тривале допустиме навантаження можна знайти шляхом складання рівняння теплового балансу для кабелю в встановився тепловий режим на основі теплового закону Ома.

Для визначення допустимого максимального струмового навантаження складемо теплову схему заміщення кабелю напругою 20 кВ, завдавши на ній усі джерела тепла, які враховуються при розрахунку для даного кабелю, термічні опори конструктивних елементів кабелю і довкілля. Джерелами тепла в кабелі є діелектричні втрати в СПЕ, ізоляції і в металевому екрані.

Діелектричні втрати в ізоляції пов'язані з реалізацією повільних видів поляризації та електропровідності в ізоляції кабелю.

Діелектричні втрати в ізоляції:

$$P_{из} = U_{\phi}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta = \left(\frac{20}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot 10^6 \cdot 314 \cdot 4,682 \cdot 10^{-10} \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 0,071 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

де $\operatorname{tg} \delta = 4 \cdot 10^{-4}$ - тангенс кута діелектричних втрат для СПЕ, постійний по всій товщині ізоляції;

$\omega = 2 \pi f = 314$ – кутова частота.

Далі порахуємо втрати в металевому екран. Змінне магнітне поле, що виникає при протіканні змінного струму по жилах кабелів, приводить до втрат енергії в металевих оболонках (екранах), що пояснюється наявністю вихрових струмів і поздовжніх ЕРС, що наводяться взаємоіндукцією жил і екрану, і обумовлених ними поздовжніх струмів замкнутих металевих оболонок. Втрати в оболонках, екранах виявляються тільки в одножильних кабелях і пов'язані з величиною електричного опору цих елементів та взаємним розташуванням

кабелів один щодо одного (у площині або трикутником).

Переріз екрану визначається по струму короткого замикання, при якому струм у екрані стає дорівнює струму у фазі.

$$I_{кз} = K_э \cdot \frac{F_э}{\sqrt{t_k}} \quad (3.33)$$

де $I_{кз} = 6,1$ кА - допустимий струм однофазного короткого замикання для кабелів з ізоляцією з СПЕ на 20 кВ;

Таблиця 3.6 – Допустимий струм короткого замикання ІК для мідної жили та екрану

F_E або $F_{Ж}$, мм ²	$I_{К}$, кА	
	Жила	Екран
35	4,9	6,1
50	7,1	8,7
70	9,9	12,2
95	13,4	16,5
120	16,9	20,9
150	21,2	26,1
185	26,1	32,2
240	33,8	41,8
300	42,3	52,2
400	56,4	69,6

Переріз мідного екрану:

$$S_{\text{э}} = \frac{I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{t_{\text{к}}}}{K_{\text{э}}} = \frac{6,1 \cdot \sqrt{1}}{0,153} = 39,86 \text{ мм}^2 \quad (3.34)$$

$K_{\text{э}} = 0,153 \div 0,203 \text{ кА} / \text{мм}^2$ - коефіцієнт пропорційності екран;

$t_{\text{к}} = 1 \text{ с}$ – умовне час короткого замикання.

Згідно зі СОУ номінальний переріз мідного екрану в одножильних кабелях і трижильних кабелях з секторними жилами і сумарний переріз мідних екранів, накладених на кожну ізольовану круглу жилу в трижильних кабелях, має бути не менше 35 мм^2 – для кабелів з жилами номінальним перетином більше 400 мм^2 . Отже, розрахований переріз проходить по умові СОУ.

Знайдемо реальний переріз екрану, для цього визначимо перетин однієї дроту:

$$S_{\text{дрэ}} = \pi \frac{d_{\text{дрэ}}^2}{4} = \pi \frac{2^2}{4} = 3,14 \text{ мм}^2$$

Кількість дротів в екрані:

$$n_{\text{др}} = \frac{S_{\text{эк}}}{S_{\text{дрэ}}} = \frac{35}{3,14} = 11,141$$

Округлюємо до цілого :

$$n_{\text{др}} = 11$$

Реальний переріз екрану:

$$S_{\text{эк}} = n_{\text{др}} \cdot S_{\text{дрэ}} = 11 \cdot 3,14 = 34,54 \text{ мм}^2$$

Електричне опір екрану:

$$R_{\text{эк}} = \rho_{\text{Cu}} \frac{1}{S_{\text{эк}} \cdot 10^{-6}} = 1,724 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{34,54 \cdot 10^{-6}} = 4,724 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Взаємний індуктивний вплив:

$$X = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{a}{R_{\text{эк}}}\right) = 2 \cdot 314 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{52,742}{24,221}\right) = 4,901 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

Втрати в різних металевих оболонках визначаються як відношення їх до втрат в струмопровідній жилі:

$$y_{\text{эк}} = \frac{P_{\text{ЭК}}}{P_{\text{ж}}}$$

Індуктивний опір:

$$X_m = 0,435 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$$

Коефіцієнти:

$$Q = X - \frac{X_m}{3} = 4,901 \cdot 10^{-5} - \frac{0,435 \cdot 10^{-4}}{3} = 3,451 \cdot 10^{-5}$$

$$N = X + X_m = 4,901 \cdot 10^{-5} + 0,435 \cdot 10^{-4} = 9,251 \cdot 10^{-5}$$

Коефіцієнт втрат для середнього кабелю при прокладці в площині:

$$y_{\text{об2}} = \frac{R_{\text{эк}}}{R_{\text{Г}}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{\text{эк}}}{Q}\right)^2} = \frac{4,724 \cdot 10^{-4}}{3,773 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{4,724 \cdot 10^{-5}}{3,451 \cdot 10^{-5}}\right)^2} = 0,063$$

Коефіцієнти втрат для крайніх кабелів:

$$\begin{aligned}
y_{об1} &= \frac{R_{ЭК}}{R_T} \cdot \left(\frac{0.75 \cdot N^2}{R_{ЭК}^2 + N^2} + \frac{0.25 \cdot Q^2}{R_{ЭК}^2 + Q^2} + \frac{2 \cdot R_{ЭК} \cdot N \cdot X_m}{\sqrt{3} \cdot R_{ЭК}^2 + N^2 \cdot R_{ЭК}^2 + Q^2} \right) = \\
&= \frac{4.724 \cdot 10^{-4}}{3.773 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{(0.75 \cdot (9.251 \cdot 10^{-5})^2)}{(4.724 \cdot 10^{-4})^2 + (9.251 \cdot 10^{-5})^2} + \\
&+ \frac{0.25 \cdot (3.451 \cdot 10^{-5})^2}{(4.724 \cdot 10^{-4})^2 + (3.451 \cdot 10^{-5})^2} + \\
&+ \frac{2 \cdot 4.724 \cdot 10^{-4} \cdot 9.251 \cdot 10^{-5} \cdot 0.435 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3} \cdot (4.724 \cdot 10^{-4})^2 + (9.251 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (4.724 \cdot 10^{-4})^2 + (3.451 \cdot 10^{-5})^2} = 0.346 \\
y_{об3} &= \frac{R_{ЭК}}{R_T} \cdot \left(\frac{0.75 \cdot N^2}{R_{ЭК}^2 + N^2} + \frac{0.25 \cdot Q^2}{R_{ЭК}^2 + Q^2} - \frac{2 \cdot R_{ЭК} \cdot N \cdot X_m}{\sqrt{3} \cdot R_{ЭК}^2 + N^2 \cdot R_{ЭК}^2 + Q^2} \right) = \\
&= \frac{4.724 \cdot 10^{-4}}{3.773 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{0.75 \cdot (9.251 \cdot 10^{-5})^2}{(4.724 \cdot 10^{-4})^2 + (9.251 \cdot 10^{-5})^2} + \\
&+ \frac{0.25 \cdot (3.451 \cdot 10^{-5})^2}{(4.724 \cdot 10^{-4})^2 + (3.451 \cdot 10^{-5})^2} - \\
&- \frac{2 \cdot 4.724 \cdot 10^{-4} \cdot 9.251 \cdot 10^{-5} \cdot 0.435 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{3} \cdot (4.724 \cdot 10^{-4})^2 + (9.251 \cdot 10^{-5})^2 \cdot (4.724 \cdot 10^{-4})^2 + (3.451 \cdot 10^{-5})^2} = 0.314
\end{aligned}$$

Після знаходження діелектричних втрат, зробимо розрахунок теплових опорів елементів кабелю та навколишнього середовища. Наступне, для встановлення режиму запишемо тепловий закон Ома і розрахуємо максимально допустимий струм навантаження.

До тепловим опору елементів кабелю відносяться:

- тепловий опір ізоляції S_z ;
- тепловий опір роздільного шару S_{pc1} ;
- тепловий опір роздільного шару з склострічки S_{ccT} ;
- тепловий опір внутрішньої оболонки $S_{вн. про}$;
- тепловий опір термічного бар'єру $S_{тб}$;
- тепловий опір зовнішній оболонки $S_{н. про}$;
- тепловий опір навколишнього середовища $S_{порівн}$.

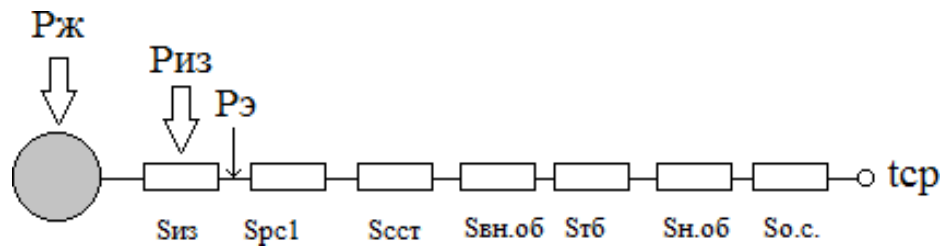


Рисунок 3.3 – Теплова схема заміщення кабелю

Тепловий опір ізоляції зі зшитого ПЕ:

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{из}}{r_{эж}}\right) = \frac{3}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{21,427}{15,927}\right) = 0,142 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (3.35)$$

де $\sigma_{из} = 3 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$ - питомий термічний опір для СПЕ. Теплове опір зовнішній оболонки:

$$S_{н.об} = \frac{\sigma_{об}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{к}}{R_{pc4}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{28,627}{26,127}\right) = 0,073 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (3.36)$$

де $\sigma_{об} = 5 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$ - питомий термічний опір полівінілхлоридного пластикату.

Теплове опір внутрішньої оболонки:

$$S_{ен.об} = \frac{\sigma_{об}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{c3}}{R_{c2}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{25,727}{23,927}\right) = 0,048 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (3.37)$$

де $\sigma_{об} = 5 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$ - питомий термічний опір полівінілхлоридного пластикату.

Тепловий опір роздільного шару 1:

$$S_{pc1} = \frac{\sigma_{el}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{el}}{R_{из}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{22,227}{21,821}\right) = 0,015 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (3.38)$$

де $\sigma_{об} = 5 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2}{\text{Вт}}$ - питомий термічний опір електропровідного паперу.

Теплове опір шару зі склострічки :

$$S_{csm} = \frac{\sigma_{c2}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{c2}}{R_{c1}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{23,92}{22,227}\right) = 0,058 \frac{^{\circ}C}{Вт} \quad (3.39)$$

де $\sigma_{об} = 5 \frac{^{\circ}C \cdot м^2}{Вт}$ - питомий термічний опір склострічки.

Тепловий опір термічного бар'єру:

$$S_{mb} = \frac{\sigma_{at}}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{R_{c4}}{R_{c2}}\right) = \frac{5}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{26,127}{23,92}\right) = 0,07 \frac{^{\circ}C}{Вт} \quad (3.40)$$

За умовами завдання, кабель прокладається в тунелі. Кабельні тунелі та колектори рекомендується споруджувати в містах та на підприємствах з ущільненою забудовою території або при великому насиченні території підземними інженерними комунікаціями, а також на територіях великих металургійних, машинобудівних і інших підприємств. Кабелі в тунелях розташовуються по конструкції (полкам).

Геометричні розміри даних споруд нормуються ПУЕ.

Оскільки кабель у тунелі знаходиться на полицях, то можна вважати, що кабель прокладається в повітрі, то охолодження такого кабелю здійснюється з допомогою конвекції. Кількість тепла, що відводиться при цьому з його поверхні, залежить від величин і стану, а також від різниці температур між кабелем і повітрям.

У кабельних спорудах і інших приміщеннях повинен бути організований систематичний контроль за тепловим режимом роботи кабелів, температурою повітря і роботою вентиляційних пристроїв.

Температура повітря всередині кабельних тунелів, каналів та шахт в літнє час повинна бути не більше чим на $10^{\circ}C$ вище температури зовнішнього повітря.

Теплове опір повітря в тунелі:

$$S_{\epsilon} = \frac{1}{h \cdot \pi \cdot D_{\kappa} \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t^{1/4}} = \frac{1}{8,2 \cdot \pi \cdot 57,254 \cdot 10^{-3} \cdot 65^{1/4}} = 0,0218 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}} \quad (3.41)$$

де h - коефіцієнт конвективної тепловіддачі;

$\Delta t = t_{нк} - t_{cp} = 15^{\circ}\text{C}$ - різниця температури поверхні кабелю і температури навколишнього середовища.

Коефіцієнт конвективної тепловіддачі для кабелю діаметром від 5 до 150 мм можна, можливо розрахувати за формулою:

$$h = 4,54 \sqrt[4]{\frac{\Delta t_{\kappa}}{D_{\kappa} \cdot 10^{-1}}} = 4,5 \cdot \sqrt[4]{\frac{15}{57,254 \cdot 10^{-1}}} = 5,24 \frac{\text{Вт}}{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}^2} \quad (3.42)$$

Визначаємо максимальний струм навантаження з врахуванням взаємного те

$$\begin{aligned} J_{\max 2} &= \sqrt{\frac{(t_{ж} - t_{cp}) - P_{из} \cdot (0,5S_{из} + S_{pc1} + S_{cctm} + S_{en.ob} + S_{mb} + S_{h.ob} + S_{o.c.})}{R_T \cdot [S_{из} + (1 + y_{ob2}) \cdot (S_{pc1} + S_{cctm} + S_{en.ob} + S_{mb} + S_{h.ob} + S_{o.c.})]}} = \\ &= \sqrt{\frac{(90 - 25) - 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot (0,5 \cdot 0,142 + 0,00 + 0,0015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)}{4,289 \cdot 10^{-5} \cdot [0,142 + (1 + 0,063) \cdot (0,0051 + 0,015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)]}} = 1,968 \cdot 10^3 \text{ А} \\ J_{\max 2} &= \sqrt{\frac{(t_{ж} - t_{cp}) - P_{из} \cdot (0,5S_{из} + S_{pc1} + S_{cctm} + S_{en.ob} + S_{mb} + S_{h.ob} + S_{o.c.})}{R_T \cdot [S_{из} + (1 + y_{ob2}) \cdot (S_{pc1} + S_{cctm} + S_{en.ob} + S_{mb} + S_{h.ob} + S_{o.c.})]}} = \\ &= \sqrt{\frac{(90 - 25) - 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot (0,5 \cdot 0,142 + 0,0051 + 0,0015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)}{4,289 \cdot 10^{-5} \cdot [0,142 + (1 + 0,346) \cdot (0,0051 + 0,015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)]}} = 1,82 \cdot 10^3 \text{ А} \\ J_{\max 2} &= \sqrt{\frac{(t_{ж} - t_{cp}) - P_{из} \cdot (0,5S_{из} + S_{pc1} + S_{cctm} + S_{en.ob} + S_{mb} + S_{h.ob} + S_{o.c.})}{R_T \cdot [S_{из} + (1 + y_{ob2}) \cdot (S_{pc1} + S_{cctm} + S_{en.ob} + S_{mb} + S_{h.ob} + S_{o.c.})]}} = \\ &= \sqrt{\frac{(90 - 25) - 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot (0,5 \cdot 0,142 + 0,0051 + 0,0015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)}{4,289 \cdot 10^{-5} \cdot [0,142 + (1 + 0,314) \cdot (0,0051 + 0,015 + 0,048 + 0,07 + 0,073 + 0,0218)]}} = 1,835 \cdot 10^3 \text{ А} \end{aligned}$$

При груповій прокладці кабелів в тунелі в залежності від кількості та їх взаємного розташування необхідно враховувати взаємне тепловий вплив кабелів один на одного. Тобто, необхідно коригувати значення максимального допустимого струму.

$$J_{MAX,GP} = k \cdot J_{max}$$

Коефіцієнт k для прокладки на полицях з обліком циркуляції повітря визначається по таблиці 1, і дорівнює 0,9.

Таблиця 3.7 – Коефіцієнт k для прокладки кабелів

Кількість ланцюгів			
1	2	3	4
1	0,97	0,96	1
0,97	0,94	0,93	2
0,96	0,93	0,93	3
0,94	0,91	0,9	4-6

$$I_{max,sp} = 0,9 \cdot 1,968 = 1,84A \quad (3.43)$$

Визначимо реальну потужність, яка може бути передана по лінії для прийнятих умов прокладання:

$$P = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{max} = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 1,84 = 63,739 \cdot 10^3 \text{ кВт} \quad (3.44)$$

За умовою один такий кабель повинен передавати потужність рівну 62,5 МВА, реальна ж потужність, що зможе передаватися по лінії з урахуванням прийнятих умов прокладки складає 63,73 МВА. Умова виконується.

Якщо реальна потужність виявиться меншою за потрібну, то слід скористатися одним або декількома методами, що дозволяють підвищити передану потужність:

- при прокладці кабелю в землі використовувати засипний ґрунт з низьким питомою тепловим опором;

- застосувати зовнішнє, внутрішнє або непряме охолодження кабелю;

Збільшити номінальне переріз ТПЗ і провести повторно електричний та

тепловий розрахунок кабелю.

3.3 Розрахунок залишкового ресурсу при заданих умовах експлуатації

Для початку необхідно перетворити формули, виведені в пункті розробки моделі з метою підстановки в них змінних, заданих умовами експлуатації. Враховуючи експоненційний характер функцію можна уявити в вигляді:

$$N = N_0 e^{bt} \quad (3.45)$$

де b – параметр експоненційної емпіричної залежності. Визначення параметрів функції виконується методом найменших квадратів, суть якого полягає в приведення до мінімуму розрахункових значень від значень емпіричного ряду. Завдання знаходження параметрів функції зводиться до системі рівнянь лінійної апроксимації. Для цієї цілі рівняння логарифмується:

$$\ln N = \ln N_0 + bt \quad (3.46)$$

Потім відбувається заміна:

$$N' = \ln N \quad (3.47)$$

Тоді рівняння можна уявити в вигляді:

$$N' = \ln N_0 + bt \quad (3.48)$$

Виходячи з отриманого рівняння і згідно методу найменших квадратів, знаходження параметра b зводиться до рішення рівняння:

$$b \cdot \sum_{i=1}^n t_i + n \ln N_0 = \sum_{i=1}^n N'_i \quad (3.49)$$

де n – кількість емпіричних значень. Після знаходження параметра необхідно розрахувати час до безвідмовної роботи ізоляції та час до її повного

зношування. В одній із моделей, розібраних у теоретичній частині було встановлено, що ізоляція працюватиме без відмов при руйнуванні до 35.5% означає співвідношення $N_t / N_0 = 0.645$. Тоді отримаємо, що розрахунковий термін безвідмовної роботи ізоляції складе:

$$\tau_{бр} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0,645}{b} = \frac{0,4385}{-b} \quad (3.50)$$

При відомому розрахунковому терміні безвідмовної роботи ізоляції та часу експлуатації, залишковий термін безвідмовний роботи можна, можливо розрахувати за формулою:

$$\tau_{остбр} = \tau_{сл} - \tau_{експл} \quad (3.51)$$

Для розрахунку часу до повного зношування ізоляції потрібно розрахувати час до руйнування 78% матеріалу, отже, розрахунок проводитиметься виходячи з умови $N_t / N_0 = 0.22$:

$$\tau_{сл} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1,514}{-b} \quad (3.52)$$

За відомого розрахункового терміну служби ізоляції та часу в експлуатації, залишковий ресурс можна, можливо розрахувати по формулі:

$$r_{зуст} = r_{сл} - r_{експл} \quad (3.53)$$

Необхідно привести дані о температурі і напрузі з обліком добової динаміки зміни споживання електроенергії, щоб показати приклад роботи математичної моделі і спрогнозувати знос ізоляції.

Таблиця 3.8 Дані про температуру та напругу кабелю для прогнозування залишкового ресурсу.

t, ч	T, C	U, кВ
1	85	10,05
2	85	10,1
3	90	10,1
4	95	10,15
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

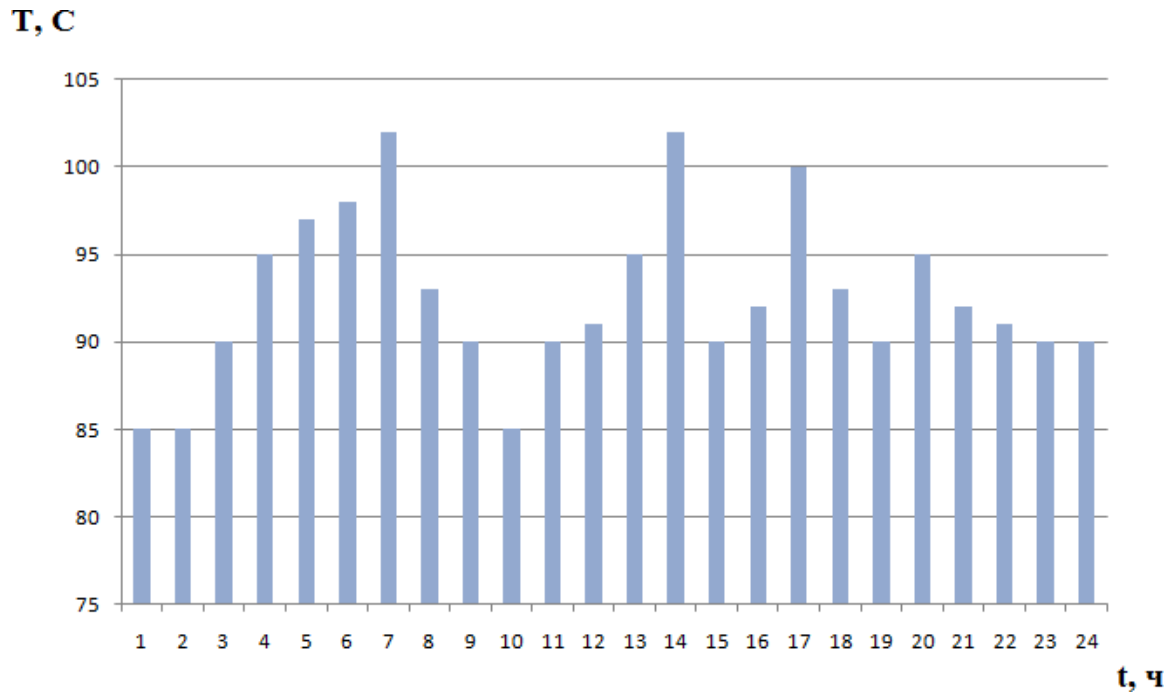


Рисунок 3.4 - Графік температури нагріву жили від часу експлуатації

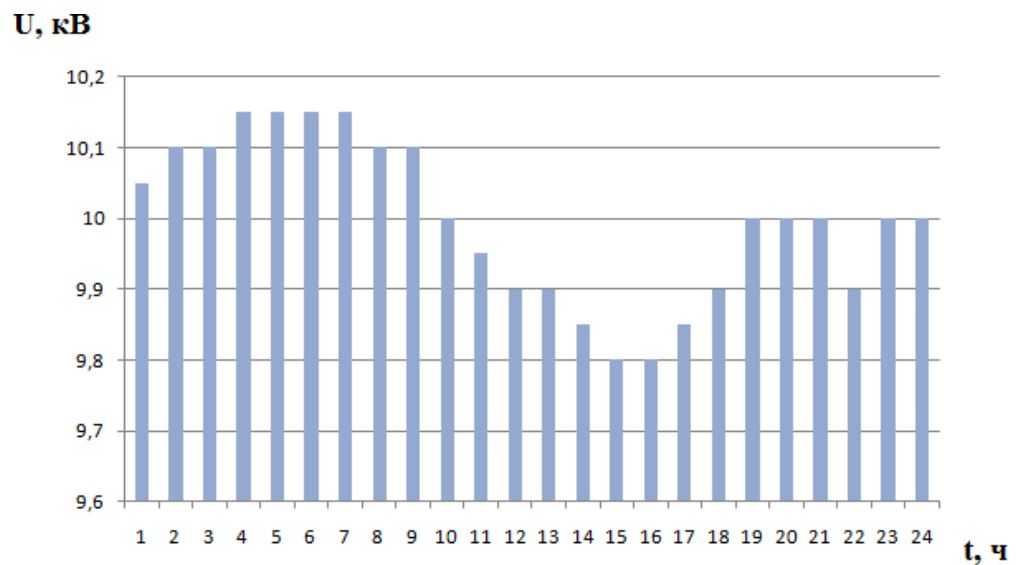


Рисунок 3.5 – Графік напруги на ізоляції кабелю

Усі параметри моделі старіння ізоляції визначення швидкості руйнування матеріалу. Константу швидкості реакції можна визначити за графіком Арреніуса для процесу термодеструкції поліетилену:

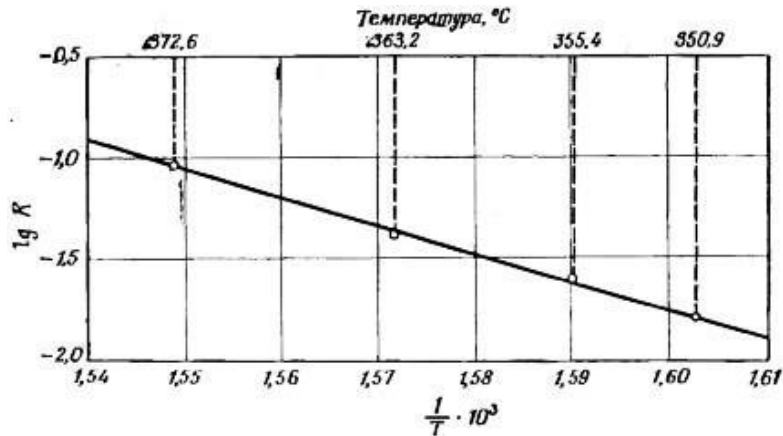


Рисунок 3.6 – Графік Арреніуса для процесу термічною деструкції поліетилену

Для визначення залежності константи швидкості реакції від температури необхідно знати рівняння прямої, поданої на рисунку 3.6. Для цього потрібно знати координати двох точок, через які проходить пряма. Прийmemo, що пряма проходить через точки з координатами (0,001548;-1,05) та (0,00159;-1,7). Відповідно до рівняння прямої, що проходить через дві точки, отримаємо:

$$\frac{\frac{1}{T} - 0,001548}{0,00159 - 0,001548} = \frac{\log K_t(T) + 1,05}{-1,7 + 1,05} \quad (3.54)$$

Звідси:

$$\log K_t(T) = \frac{1}{T} + 22,9 \quad (3.55)$$

де T - температура в Кельвінах. Однак константа швидкості реакції виражена векспоненційною формі, значить формулу слід перетворити:

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

Звідси:

$$K_t(T) = e^{\frac{1}{T} + 9,945}$$

Або

$$K_t(T) = 20854e^{\frac{1}{T}} \quad (3.56)$$

Також необхідно визначити параметри формули потужності часткових розрядів:

$$P_{чр} = B \cdot U^n \quad (3.57)$$

Параметри формули визначалися виходячи з електричного розрахунку. Значення параметрів змінювалися в процесі старіння, однак в моделі пропонується взяти усереднені значення: $B = 5.536 \cdot 10^{-3}$ та $n = 5$. Параметр c , визначальний синергізм впливу теплового і електричного полів прийнятий рівним 0.01. N_0 приймемо рівним числу Авогадро $6.022 \cdot 10^{23}$.

Підставивши отримані параметри в формулу швидкості руйнування), отримаємо:

$$v(t) = 0.01 \cdot 5.536 \cdot 10^{-3} \cdot U^5 \cdot 20854e^{\frac{1}{T}} \cdot 6.022 \cdot 10^{23} \cdot e^{-0.01 \cdot 5.536 \cdot 10^{-3} \cdot U^5 \cdot 20854e^{\frac{1}{T}}}$$

Використовуючи формулу, графіки температури та напруги (рисунки 3.4 та 3.5) і значення параметрів (таблиця 3.8) було здійснено розрахунок та отримано функція зміни кількості незруйнованих молекул матеріалу. Для отриманої емпіричної функції був зроблено підбір експоненційно - розрахункової функції з пакета програм Matlab.

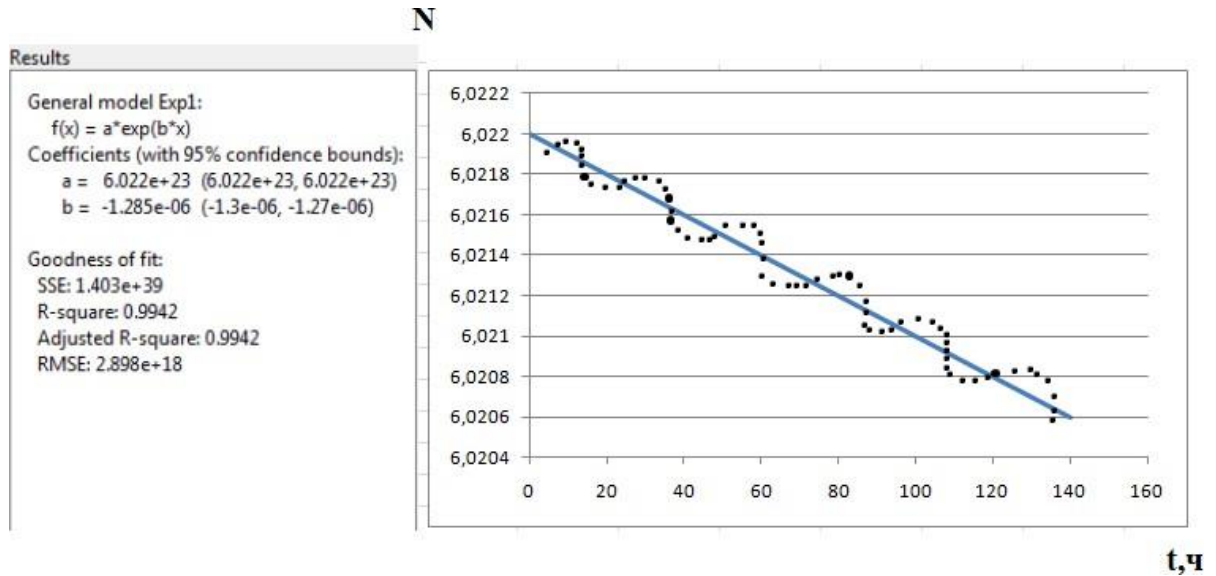


Рисунок 3.7 - Графік зміни кількості незруйнованих молекул матеріалу в процесі експлуатації

Виходячи з формули (3.50), термін безвідмовний роботи ізоляції складає:

$$\tau_{\text{бр}} = \tau_{\text{бр}} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{0.4385}{0.00000263} = 166730 = 19 \text{ років} \quad (3.59)$$

Термін служби ізоляції до її повного зносу складає:

$$\tau_{\text{сл}} = \frac{\ln 0,22}{b} = \frac{1.514}{0.0000059} = 302220 \text{ ч} = 34.5 \text{ років} \quad (3.60)$$

Залишковий ресурс дорівнює:

$$\tau_{\text{ост}} = \tau_{\text{сл}} - \tau_{\text{експл}} = 302220 - 168 = 302052 \text{ ч} = 34.4 \text{ роки}$$

Залишковий ресурс, років

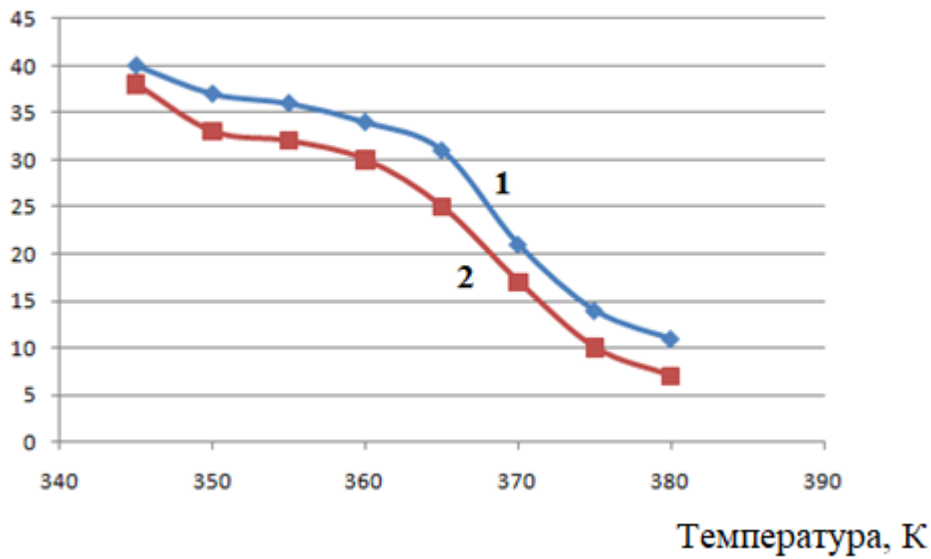


Рисунок 3.8 - Графік залежності залишкового ресурсу від експлуатаційних факторів

Оцінка похибки розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелів.

Відносна похибка розрахунку прогнозованого терміну служби ізоляції визначається формулою:

$$\varepsilon_{\tau_{сл}} = \frac{\Delta\tau_{сл}}{\tau_{ост}} \cdot 100\% = \frac{2,752}{34,4} \cdot 100\% = 8\% \quad (3.61)$$

Похибка необхідно визначити в області робочих значень вимірюваних величин, якими є напруга, струми в жилі й екрані та температура поверхні кабелю. Виходячи з отриманих результатів розрахунку, за допомогою запропонованому пристрою та математичної моделі рекомендується оцінювати терміни служби кабелів, експлуатованих в помірному та холодному кліматі та прокладених у землі. В даному випадку похибка розрахунку терміну служби ізоляції, що оцінюється, складе приблизно 8%.

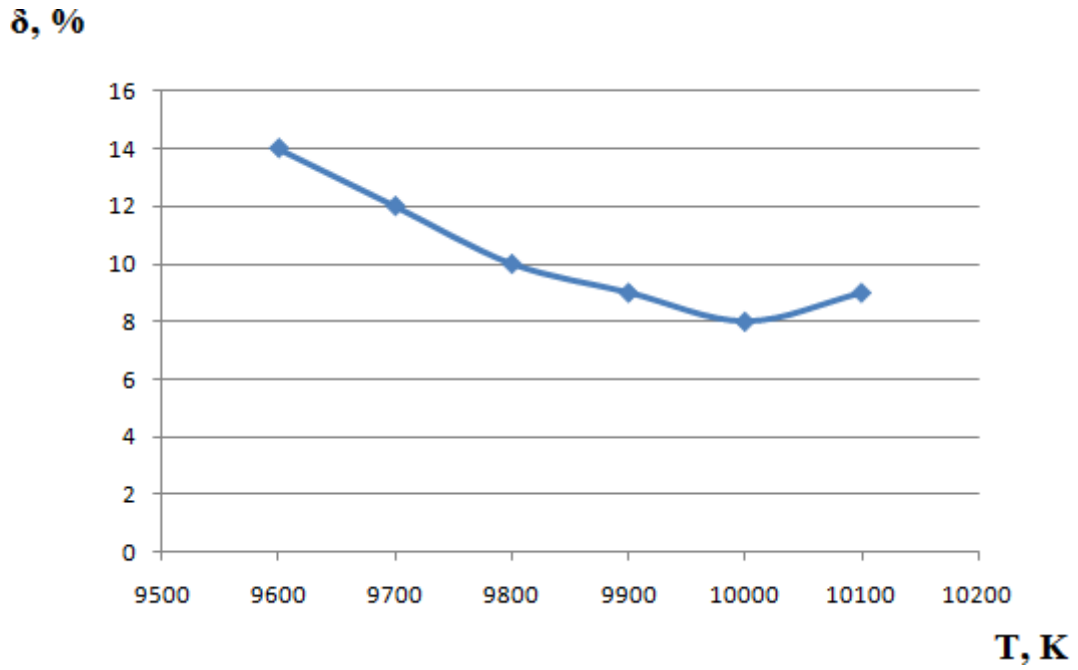


Рисунок 3.9 - Залежність відносною похибки від напруги

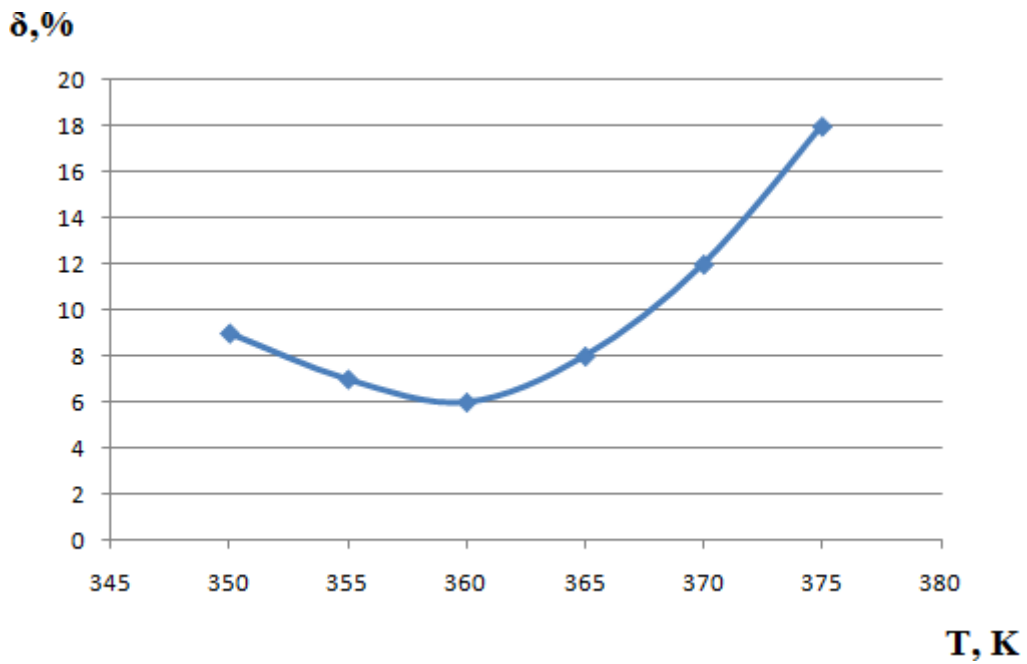


Рисунок 3.10 – Залежність відносної похибки від температури поверхні кабелю

3.4 Оцінка отриманих результатів

Запропоновано математичну модель розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю, використання якої дозволить спрогнозувати зношування ізоляції.

Аналіз конструкції кабелю показав, що для розрахунку ресурсу ізоляції достатньо враховувати вплив температури та електричного поля на ізоляцію. Розглянутий приклад говорить про можливість використання математичної моделі в пристрої моніторингу залишкового ресурсу ізоляції.

Аналіз відомих математичних моделей старіння ізоляції показав подібний характер зміни терміну служби залежно від чинних параметрів. У якості опорний математичної моделі вирішено використовувати модель, яка ґрунтується на енергетичних впливах на ізоляцію. Запропонована математична модель розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю дозволяє спрогнозувати знос ізоляції і необхідність її заміни з урахуванням коригування, внесених після аналізу результатів експериментальних досліджень. Важливою перевагою моделі є її реалізованість в пристрої моніторингу залишкового ресурсу ізоляції.

Результати експериментальних досліджень показали необхідність коригування математичної моделі визначення залишкового ресурсу ізоляції, так як спостерігалася розбіжність результатів розрахунку і експерименту, викликана тим, що математична модель не враховує усі фактори, які руйнують ізоляцію, крім напруги і температури. Для коригування моделі введена відносна похибка, яка враховує вплив інших факторів.

ВИСНОВОКИ

В магістерській роботі розглянуто основні конструкції кабелів для мереж середньої (6-35 кВ) та високої напруги (від 35 кВ до 330 кВ). За результатами досліджень літературних джерел встановлено, що найбільш перспективним є використання кабелів зі зшитого поліетилену. Це пов'язано з покращеними характеристиками механічної та термічної стійкості кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену пов'язані з їх молекулярною структурою. На етапі вулканізації чи «зшивки» ізоляційного матеріалу створюються нові зв'язки шляхом розподілу молекул поліетилену.

Вивчено основні методи діагностики та контролю стану ізоляції кабельних ліній зі ізоляцією з зшитого поліетилену.

Проведено аналіз впливів, наданих зовнішніми і внутрішніми факторами на ізоляцію кабелів в процесі експлуатації. Встановлено, що в процесі експлуатації кабельних ліній електропередачі з ізоляцією із зшитого поліетилену ізоляційний матеріал може піддаватися ряду зовнішніх і внутрішніх руйнівних впливів, що приводять до його старіння.

Розглянуто існуючі моделі для розрахунку ресурсу ізоляції.

Запропоновано математичну модель для прогнозування залишкового ресурсу, яка використовує розрахунок силового кабелю з пластмасовий ізоляцією, а саме електричний розрахунок, тепловий розрахунок і розрахунок залишкового ресурсу при заданих умовах експлуатації.

Запропонована математична модель розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю дозволяє спрогнозувати зношення ізоляції та необхідність її заміни з урахуванням коригувань, внесених після аналізу результатів експериментальних досліджень. Важливою перевагою моделі є її реалізованість в пристрої моніторингу залишкового ресурсу ізоляції.

Оцінка результатів розрахунків показала, що похибка розрахунку терміну служби ізоляції складає близько 8%.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Матвійчук В. А. Діагностування електрообладнання: навчальний посібник / В. А. Матвійчук, О. Є. Рубаненко, І. О. Гунько. ВНАУ – Вінниця:ТОВ «ТВОРИ», 2020. – 140 с.

2. Матвійчук В. А. Визначення якості функціонування ділянки із зниженим опором ізоляції мережі оперативного постійного струму за допомогою нейро-нечіткого моделювання/ В. А. Матвійчук, О. Є. Рубаненко, О. О. Рубаненко// Вісник Хмельницького національного університету. – 2015 – №3. – С. 187-195.

3. Перспективи використання нових матеріалів для кабелів середньої та високої напруги Приазовський державний технічний університет, – 2019 – 41 с.

Режим доступу: <https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2019/03/%D0%9A%D0%B0%D0%B1%D0%B5%D0%BB%D1%96-%D1%81%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D1%8C%D0%BE%D1%97-%D1%82%D0%B0-%D0%B2%D0%B8%D1%81%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%97-%D0%BD%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%B8.pdf>

4.Сучасні методи та засоби оцінки і контролю ізоляції високовольтних кабельних ліній Харків 2018 Режим доступу:

<https://events.pstu.edu/konkurs-energy/wp-content/uploads/sites/2/2019/03/%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BB%D1%8C-%D0%BA%D0%B0%D0%B1%D0%B5%D0%BB%D1%96%D0%B2.pdf>

5.Діагностика стану електротехнічного обладнання: Курс лекцій [навч. посіб.]: для студ. спеціальності 141«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньо-професійних програм «Електротехнічні пристрої та

електротехнологічні комплекси» / КПІ ім.Ігоря Сікорського; уклад.: О. Р. Проценко — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 162 с.

6. СОУ НЕК 29.240.6-23:2021 Силові кабельні лінії напругою 10-330 кВ з ізоляцією із зшитого поліетилену. Організація експлуатації Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго» (ДП «НЕК «Укренерго») 2021 Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98465

7.СОУ-Н МЕВ 40.1-37471933-49:2011 Проектування кабельних ліній напругою до 330 кВ. Настанова Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України НЕК «Укренерго» (НПЦР ОЕС України) 2017– Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=72188

8.Євтух Є.С. Діагностика силових кабельних ліній, особливості та проблеми, що виникають під час експлуатації/, О.В. Михайлов, О.О. Вакуленко// Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 25-26 листопада – 2015. – С.117-118.

9. Інструкція по вибору, монтажу та експлуатації кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену на перемінну напругу 6,10,15, 20,30 і 35 кВ. ЗЗКПП 2021 – 87 с.

10. Михайлів В.І. Перехідні електромагнітні процеси у неоднорідній електричній ізоляції високовольтних кабелів при їх діагностиці методами вимірювання і аналізу струму релаксації та поверненої напруги. / В.І. Михайлів, С. С. Розіскулов, , Б. Л. Грабчук // Методи та прилади контролю якості. – ІФНТУНГ. – 2013. – №1 (30) – С.84-93.

11.Правила улаштування електроустановок (ПУЕ-2018). Вид. офіц. Харків: Форт,– 2018.– 458 с.

12.ДСТУ EN 60228:2015. Провідники ізольованих кабелів.Загальні технічні вимоги (EN 60228:2005; АС:2005, ІДТ). Чинний від 2017-01-01. Одеса, НТЦ АЗУ, –2015.

13.ДСТУ ІЕС 60287-1-1:2009. Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 1-1. Співвідношення для обчислення номінальної сили струму (коефіцієнт навантаження 100 %) і обчислення втрат. Загальні положення (ІЕС 60287-1-1:2001, ІДТ). Чинний від 2011-07-01. Medium and high voltage XPLE-insulated power cables. Kharkov, Yuzhkabel. 56 р. Режим доступу: <https://www.powerandcables.com/product/product-category/33kv-mv-hv-cables-2/>

14. ДСТУ ІЕС 60287-3-1:2008 Електричні кабелі – Розрахунок номінального струму – Частина 3–1: Розділи щодо умов експлуатації – Розгляд умов експлуатації і вибору типу кабелю). – Чинний 2012.– 214 с. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=94379

15.ДСТУ ІЕС 60287-3-1:2009 Кабелі електричні. Обчислення номінальної сили струму. Частина 3-1. Нормативні умови експлуатації та вибір типу кабелю (ІЕС 60287-3-1:1999, ІДТ) – 20с. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=81781

16.Гурин А.Г. Визначення навантажувальної здатності силових кабелів : навч.-метод. посіб. / Гурин А.Г., Щебенюк Л.А. – Х. : НТУ «ХП», 2013. – 136 с.

17.Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість: [підруч. для студ. вузів] / В. П. Карпушенко, Л. А. Щебенюк, Ю. О. Антонець, О. А. Науменко. – Х. : Регіон-інформ, 2000. – 376 с.

18.Куценко Ю.М. Монтаж електрообладнання і систем керування [Електронний ресурс] : підручник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев ; за заг. ред. проф. В.Ф. Яковлева. – К.: Аграрна освіта, 2009. – 348 с. – режим доступу: <http://elib.chdtu.edu.ua/e-books/4895>

19.Калетнік Г. М. Основи інженерних методів розрахунків на міцність і жорсткість / Г. М. Калетнік, М. Г. Чаусов, В. М. Швайко. – Київ: «Хайт-Тек Прес», 2013. – 528 с.

20. Безпрозванних Г.В., Мірчук І.А. Б40 Синтез технологічних режимів охолодження та радіаційного опромінення електричної ізоляції кабелів: монографія / Г.В. Безпрозванних, І.А. Мірчук. – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 179 с.

21.Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання. Конспект лекцій (для студентів 5 курсу денної і 6 курсу заочної форм навчання спеціальності 7.0906003 – «Електричні системи електроспоживання») / Авт. А.В. Хитров – Харків: ХНАМГ, 2009. – 328 с. Режим доступу: https://www.studmed.ru/hitrov-av-montazh-naladka-ekspluatsiya-elektroobladnannya-konspekt-lekcy_c0ef1c5d093.html