

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри
_____ /Д. О. Босий/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи
електроспоживання**

Тема **Оцінка залишкового ресурсу високовольтних кабельних ліній зі
зшитого поліетилену**

Theme **Estimation of residual life of high-voltage cable lines made of cross-
linked polyethylene**

Керівник дипломної роботи доц. _____ А. В. Антонов

Нормоконтролер доц. _____ В. М. Ляшук

Студентка групи ЕС1926 _____ К. В. Кожушняк

Student Kozhushnyak Kateryna

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Факультет «Управління енергетичними процесами»
Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»
Галузь 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація Електротехнічні системи електроспоживання

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
В.О. завідувача кафедри
_____ Сиченко В.Г.
(підпис)
«20» січня 2020р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС _____ магістр
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

студента групи ЕС1926 Кожушняк К.В.
(номер групи) (ПІБ)

1 Тема дипломної роботи: «Оцінка залишкового ресурсу високовольтних кабельних ліній зі зшитого поліетилену»

затверджена наказом по університету від «17» січня 2020 р. № 53ст.

2 Термін подання студентом закінченої роботи «7» грудня 2020р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту (роботи): нормативні документи щодо прокладки кабельних ліній, настанова для розрахунку кабельних ліній до 330 кВ

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): дослідження питання діагностування стану ізоляції, розробка основ математичного моделювання залишкового ресурсу ізоляції кабелів, результати моделювання

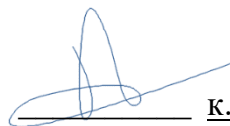
5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Обсяг розділу, %
ВСТУП	23.09	5
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ СТАНУ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ	15.10	25
ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ	11.11	30
РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ	25.11	30
ВИСНОВКИ	04.12	5
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	07.12	5

Дата видачі завдання: «17» вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи



(підпис)

К.Т.Н., доц. Антонов А.В.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Кожушняк К.В.

(ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 62 сторінки, складається з 3 розділів та містить 27 ілюстрацій, 2 таблиці, 87 бібліографічних джерел.

Мета роботи – Розробка способу оцінки стану залишкового ресурсу кабельних ліній із зшитого поліетилену.

Надійність систем електропостачання безпосередньо залежить від стану ізоляції кабельних ліній електропередачі (КЛЕП). Однак традиційні методи контролю стану ізоляції не дозволяють повністю виключити можливість пробою ізоляції. У зв'язку з цим, в даний час актуальними є дослідження з розробки способів і пристроїв моніторингу стану ізоляції в режимі онлайн, які могли б розраховувати залишковий ресурс ізоляції КЛЕП в процесі експлуатації для коригування планово-профілактичних заходів з метою своєчасного ремонту кабельних ліній. Цього можна досягти шляхом моніторингу чинників, які чинять руйнівний вплив на ізоляцію ліній електропередачі. Аналіз даних про ступінь зносу і залишковий ресурс ізоляції дозволяє здійснювати превентивні заходи по ремонту місць пошкодження ізоляції до її пробою, а також коригувати план профілактичних ремонтних робіт залежно від ступеня необхідності обслуговування ізоляції.

Ключові слова: КАБЕЛЬНА ЛІНІЯ, ЗШИТИЙ ПОЛІЕТИЛЕН, ІЗОЛЯЦІЯ, СТАРІННЯ

ЗМІСТ

ВСТУП..	6
1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОЦІНКИ СТАНУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ	9
1.1 Діагностування та контроль стану ізоляції кабельних ліній із зшитого поліетилену	9
1.2 Проведення випробувань підвищеною напругою	10
1.3 Вимірювання часткових розрядів	13
1.3.1 Реєстрація часткових розрядів	14
1.3.2 Способи фільтрації завад	17
1.3.3 Джерела часткових розрядів	18
1.3.4 Обладнання для реєстрації і аналізу характеристик часткових розрядів в кабельних лініях	20
1.4 Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат	20
1.5 Оцінка стану ізоляції по процесам поляризації/деполяризації	22
1.6 Тепловізійна, ультрафіолетова і рентген-діагностика стану ізоляції	23
1.7 Рефлектометрія	25
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВІВ НА ІЗОЛЯЦІЮ КАБЕЛІВ ІЗ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ	27
2.1 Аналіз впливів на ізоляцію кабелів	27
2.2 Аналіз відомих результатів дослідження процесів старіння ізоляції	29
3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ	34
3.1 Результати розрахунку терміну служби ізоляції	34
3.2 Визначення критерію виникнення пробою ізоляції кабелю	39
3.3 Уточнення математичної моделі визначення залишкового ресурсу ізоляції кабелів	46
3.4 Моделювання розрахунку залишкового терміну служби ізоляції кабелів у відомому режимі експлуатації	50
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	53
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розробив		Кожушняк К.В.			Оцінка залишкового ресурсу високовольтних кабельних ліній зі зшитого поліетилену		Літ.	Арк.	Аркушів
Керівник		Антонов А. В.						5	62
Н. Контр.		Ляшук В.М.					ДНУЗТ,ІСЕ гр.ЕС1926		

ВСТУП

Аналіз літературних жерел показує, що частка технологічних порушень, викликаних пробом ізоляції становить не менше 71%. При цьому, найбільш проблемними елементами кабельних ліній є ізоляція кабелів і кабельні муфти. Імовірність пробою ізоляції залежить від ступеня її зносу і залишкового ресурсу. У випадку з кабельними муфтами ймовірність їх пошкодження обумовлена якістю виготовлення матеріалів муфти і якістю її монтажу. У місцях знаходження дефектів (газових і твердотільних включень) як в ізоляції, так і в кабельних муфтах утворюються часткові розряди (ЧР), розвиток яких призводить до пробою ізоляції.

Отже, надійність систем електропостачання безпосередньо залежить від стану ізоляції кабельних ліній електропередачі (КЛЕП). Однак традиційні методи контролю стану ізоляції не дозволяють повністю виключити можливість пробою ізоляції. У зв'язку з цим, в даний час актуальними є дослідження з розробки способів і пристроїв моніторингу стану ізоляції в режимі онлайн, які могли б розраховувати залишковий ресурс ізоляції КЛЕП в процесі експлуатації для коригування планово-профілактичних заходів з метою своєчасного ремонту кабельних ліній. Цього можна досягти шляхом моніторингу чинників, які чинять руйнівний вплив на ізоляцію ліній електропередачі. Аналіз даних про ступінь зносу і залишковий ресурс ізоляції дозволяє здійснювати превентивні заходи по ремонту місць пошкодження ізоляції до її пробою, а також коригувати план профілактичних ремонтних робіт залежно від ступеня необхідності обслуговування ізоляції.

Актуальність роботи. Електроенергетика є складною системою, яка постійно розвивається і включає в себе безліч джерел і споживачів електричної енергії. Мінімізація раптових коротких замикань (КЗ) дозволить значно підвищити статичну, динамічну і результуючу стійкість електроенергетичних систем. До того ж мінімізація появ КЗ підвищить тривалість безвідмовної роботи електроустановок, на які цей струм міг би впливати і за рахунок цього підвищиться надійність функціонування електроенергетичних систем.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому підвищення стійкості і надійності систем передачі і розподілу електричної енергії є одним із пріоритетних завдань розвитку електроенергетики.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Мета і завдання роботи. Розробка способу оцінки стану залишкового ресурсу кабельних ліній із зшитого поліетилену.

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання:

- аналіз існуючих способів та засобів оцінки стану ізоляції кабельних ліній;
- дослідження впливаючих факторів на процеси старіння ізоляції кабельних ліній;
- дослідження інтенсивності впливу факторів на старіння ізоляції;
- моделювання процесів старіння ізоляції в умовах експлуатації кабельних ліній;
- удосконалення математичної моделі розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю.

Предмет дослідження – моніторинг стану ізоляції кабельних ліній.

Об'єкт дослідження – високовольтний кабель зі зшитого поліетилену.

Методи дослідження – в основу роботи покладені теоретичні та емпіричні методи дослідження.

Наукова новизна та основні положення, які виносяться на захист.

Удосконалено математичну модель розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю, шляхом зміни підходу до дослідження процесу старіння ізоляції, який полягає в розгляді об'ємної частини ізоляційного матеріалу, використання такої форми дозволить врахувати можливість зростання дендрита в трьох площинах.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичне значення отриманих результатів:

Отримані в роботі результати дозволяють оцінити можливий термін експлуатації проекрованої або вже існуючої кабельної лінії при сукупності впливаючих факторів.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження отримані здобувачем самостійно.

Апробація результатів магістерської роботи. Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на Міжнародній студентській науковій конференції «Перспективні галузі наукових досліджень: динаміка та тренди», м. Суми, 16.10.2020.

Публікації

Нікітенко Д. Є., Зіненко А. В., Кожушняк К. В. Підвищення надійності функціонування елементів системи електропостачання електричного транспорту. Міжнародна студентська наукова конференція «Перспективні галузі наукових досліджень: динаміка та тренди» м. Суми, 16.10.2020. с. 88 – 89.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ОЦІНКИ СТАНУ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

1.1 Діагностування та контроль стану ізоляції кабельних ліній із 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 з споживачем) і їх ізоляція (для уникнення коротких замикань). При введенні кабельних ліній зі зшитою поліетиленовою ізоляцією в експлуатацію можуть проводитися такі випробування [1]:

- 1) Перевірка цілісності та фазування жил кабелю.
- 2) Вимірювання опору ізоляції. Величина опору не нормується, вимірювання опору проводиться до і після випробування підвищеною напругою.
- 3) Випробування номінальним або підвищеною напругою випрямленого струму (в деяких випадках проводиться випробування напругою промислової або наднизької частоти (0,01-0,1 Гц).
- 4) Вимірювання розподілу струму по одножильним кабелям. Нерівномірність у розподілі струмів на кабелях не повинна бути більше 10%.
- 5) Контроль стану антикорозійного покриття, при наявності.
- 6) Вимірювання опору заземлення.

Ізоляційні матеріали більшою мірою схильні до руйнування під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, тому найбільшу увагу слід приділити випробуванням ізоляції. Нормована перевірка підвищеною напругою, є небезпечною для ізоляції, так як, окрім підпалу наявних вад (які утворилися в процесі виробництва або як наслідок неякісного монтажу), прискорюється процес деструкції ізоляційного матеріалу, що веде до утворення нових дефектів в ізоляції і скорочення терміну її служби. Крім того, при використанні постійної напруги для випробування кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену, в них може накопичуватися об'ємний заряд, наявність якого може призвести до швидкого

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

виходу кабелю з ладу. У зв'язку з цим в даний час існує тенденція по впровадженню неруйнівних методів контролю та діагностики ізоляції, якими є [2,3]:

- 1) Вимірювання часткових розрядів в ізоляції [4-6];
- 2) Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат [7,8];
- 3) Вимірювання напруги/струму процесів поляризації/деполяризації діелектрика [9,10];
- 4) Тепловізійна, оптична, ультразвукова дефектоскопія [11,12];
- 5) Метод рефлектометрії [13].

Варто відзначити, що при використанні діагностики ізоляції на предмет часткових розрядів, вимірюванні тангенса кута діелектричних втрат, існує можливість проводити онлайн моніторинг стану ізоляції під навантаженням в режимі експлуатації.

1.2 Проведення випробувань підвищеною напругою

Випробування ізоляції підвищеною напругою є обов'язковим, згідно [1], як для нового обладнання перед введенням в експлуатацію, так і періодично протягом усього процесу експлуатації. Форма випробувальної напруги може бути різною [14]: постійною, змінною синусоїдальною, імпульсною. При цьому частіше за інші використовують постійну напруга і синусоїдальну промислової частоти.

При випробуванні ізоляції кабелів постійною напругою додатково контролюється струм витoku через ізоляцію. При цьому кабель вважається таким який пройшов випробування в разі, якщо не відбулося пробою, і якщо струм витoku не збільшився. Недоліком цього методу є різниця фізичних процесів, які протікають в ізоляції в процесі випробувань і в процесі експлуатації.

При випробуванні ізоляції підвищеною синусоїдальною напругою промислової частоти випробувальна напруга витримується на кабелі протягом 1 хвилини, а ізоляція визнається придатною до експлуатації в разі, якщо за цей час не спостерігалось пробою або часткового пошкодження ізоляції. В деяких випадках для випробування підвищеною синусоїдальною напругою використовують частоту 100 Гц, 250 Гц.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Однією з найбільш поширених установок для випробування кабелів підвищеною напругою є апарат типу АИД-70/50 (рис. 1.1). Даний апарат може генерувати постійну напругу до і змінну синусоїдальну промислової частоти.



Рисунок 1.1 Випробувальний апарат АИД-70/50

Крім того, ізоляція піддається випробуванню грозовими імпульсами. Амплітуда імпульсів визначається в залежності від характеристик грозозахисного обладнання. Передній фронт імпульсу становить 1,2 мкс, тривалість імпульсу до напівспаду – 50 мкс. При виникненні грозового імпульсу спрацьовує захисний розрядник, зрізаючий імпульс через 2-3 мкс після початку імпульсу. Таким чином, при випробуванні ізоляції подається по три імпульси позитивної і негативної полярності, спочатку повні, потім зрізані. Ізоляція вважається пройшовшою випробування, якщо не була пробита або пошкоджена. Для генерації грозових імпульсів використовуються генератори імпульсної напруги (ГІН) (рис. 1.2).

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рисунок 1.2 – Генератор імпульсних напруг

1.3 Вимірювання часткових розрядів

Частковим розрядом (ЧР) називається електричний розряд малої потужності, який шунтує лише частину ізоляції, і не викликає значної зміни напруги між електродами [15]. Як правило, часткові розряди виникають в ізоляції в місцях знаходження внутрішніх дефектів (бульбашок газів, різних мікрочастинок твердих домішок) з тієї причини, що в цих місцях виникає неоднорідність електричного поля, напруженість якого всередині дефекту може бути набагато вище, ніж в ізоляційному матеріалі. Як правило, електрична міцність домішок істотно менше електричної міцності ізоляції, тому в місці дефекту виникає локальний електричний пробій.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Оцінку стану ізоляції проводять по одній або декільком характеристикам часткових розрядів, якими є [6]:

1) Уявний заряд – абсолютне значення такого заряду, при миттєвому веденні якого на електроди випробуваного об'єкта напруга між ними короткочасно зміниться так само, як змінилося б при частковому розряді;

2) Часовий інтервал одного циклу вимірювання або число періодів впливає напруги – проміжок часу безперервного вимірювання ЧР, виражений в секундах або в числі періодів впливає напруги.

3) Регулярність виникнення - відношення числа періодів впливає напруги, в яких зареєстровані часткові розряди з удаваним зарядом більше заданої величини до загальної кількості періодів впливає напруги за певний інтервал часу;

4) Момент часу появи імпульсу або фазовий кут появи імпульсу – значення інтервалу часу від нуля попередньої позитивної напівхвилі до моменту утворення імпульсу ЧР в періоді впливає на ізоляцію змінної напруги, або кутом між нулем попередньої позитивної напівхвилі і імпульсом ЧР.

5) Частота повторення імпульсів – відношення між загальним числом імпульсів часткових розрядів, зареєстрованих в певному часовому інтервалі, і тривалістю цього інтервалу;

6) Частота проходження імпульсів (N) – число імпульсів ЧР за секунду (в разі рівновіддалених імпульсів).

7) Середній струм – сума абсолютних значень здаються зарядів ЧР від мінімального значення реєстрованого заряду до максимального за інтервал часу, поділена на цей інтервал;

8) Потужність – сума добутків значень уявних зарядів часткових розрядів за певний період часу на миттєві значення впливаючої на ізоляцію напруги в момент утворення відповідних часткових розрядів;

9) Квадратичний параметр – сума квадратів абсолютних значень здаються зарядів ЧР від мінімального значення заряду до максимального за інтервал часу, поділена на значення інтервалу часу;

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10) Розподіл кількості імпульсів N за значеннями уявних зарядів – залежність кількості ЧР від уявного заряду в діапазоні вимірювання від мінімального до максимального, зареєстрованих за інтервал часу.

11) Розподіл значень уявних зарядів по фазі напруги, що впливає – залежність значень уявних зарядів часткових розрядів від відповідних фазових кутів їх появи в періоді впливаючої напруги;

12) Розподіл числа імпульсів по їх уявним зарядам і фазі впливаючої напруги – залежність кількості імпульсів ЧР від значень їх уявних зарядів і від відповідних фазових кутів їх появи в періоді впливаючої напруги.

13) Найбільше неодноразово зустрічається значення уявного заряду – найбільша величина, яку має імпульс, неодноразово зареєстрований системою вимірювання за один інтервал часу;

14) Напруга виникнення часткових розрядів – прикладена напруга, при якій в випробуваному об'єкті вперше відзначаються повторювані ЧР при поступовому збільшенні напруги з нижчого значення, при якому ЧР не спостерігається;

15) Напруга згасання часткових розрядів – прикладена напруга, при якій в випробуваному об'єкті згасають (припиняються) повторювані ЧР при поступовому зменшенні напруги з вищого значення, при якому спостерігаються значення імпульсу ЧР.

Для визначення характеристик часткових розрядів, потрібно вирішити наступні завдання:

- Зареєструвати електричний сигнал, що містить часткові розряди;
- Провести фільтрацію сигналу апаратними та програмними методами;
- Обробити отриманий сигнал для визначення потрібних характеристик.

1.3.1 Реєстрація часткових розрядів

Зареєструвати часткові розряди можна по впливам, які вони чинять на електричні ланцюги і навколишнє середовище. Виходячи з цього, відомі такі методи реєстрації ЧР [6]:

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

- Електричний метод є найбільш точним, так як безпосередньо аналізує електричні сигнали ЧР;

- Електромагнітний (реєстрація ЧР по їх електромагнітному полю) метод також є досить точним, проте його не завжди можна використовувати для діагностики обладнання на наявність джерела часткових розрядів, так як датчики, засновані на цьому методі, можуть виявити джерело ЧР на відносно невеликій відстані. Однак при діагностиці ліній електропередачі цей метод може використовуватися для пошуку місця утворення дефекту;

- Акустичний метод дозволяє зареєструвати звуковий сигнал, що виходить від джерела ЧР, цей метод зазвичай застосовується аналогічно електромагнітному;

- Хімічний метод ґрунтується на аналізі хімічних сполук, що виділяються при ЧР, наприклад, в трансформаторному маслі. З огляду на особливості цього методу, він не підходить для реєстрації і пошуку джерел часткових розрядів в кабельних лініях електропередачі;

- Оптичний метод дозволяє зареєструвати ультрафіолетове випромінювання від джерела ЧР, як правило, використовується в системах зі скляною ізоляцією для пошуку пошкоджених елементів і не застосовується для пошуку джерел ЧР в кабельних лініях електропередачі;

- Термічний метод ґрунтується на нагріванні ізоляції в області утворення дефекту, зазвичай використовується для пошуку місця джерела ЧР в тому числі і в кабельних ЛЕП.

Для контролю стану ізоляції кабельних ліній електропередачі з ізоляцією із зшитого поліетилену доцільно застосовувати електричний метод реєстрації ЧР для їх виявлення і аналізу в сукупності з одним з методів, що дозволяють знайти джерело часткових розрядів.

Існує великий вибір датчиків, які реєструють часткові розряди, що випускаються промисловістю з можливістю їх використання для моніторингу характеристик часткових розрядів (рис. 1.3):

- Резистивні датчики [17];

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

- Високочастотні трансформатора струму з феритовим сердечником, включаються в ланцюг вимірювання струмів витoku на землю [17,18];
- Акустичні датчики [19-23];
- Електромагнітні датчики [19,24];
- Приєднувальні конденсатори [25,26];

а)



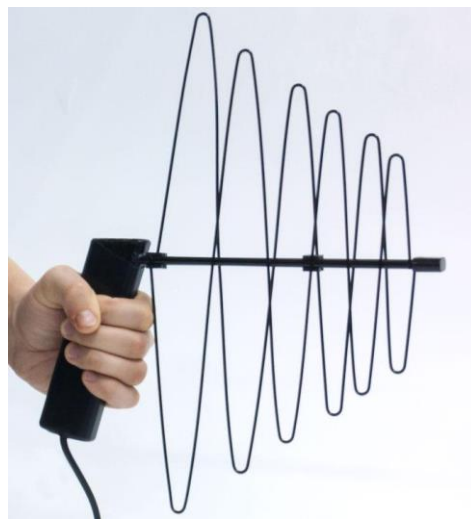
б)



в)



г)



а) трансформатор струму з феритовим сердечником; б) приєднувальний конденсатор; в) акустичний датчик; г) електромагнітна антена, уловлює ЧР в діапазоні частот від 400 до 900 МГц

Рисунок 1.3 – Датчики для реєстрації часткових розрядів

1.3.2 Способи фільтрації завад

Сучасні пристрої вимірювання характеристик часткових розрядів дають хороші результати при реєстрації сигналів, що містять ЧР. Однак тут виникає проблема розпізнавання сигналів ЧР на тлі широкого спектра можливих перешкод, які можуть з'являтися в енергосистемі як наслідок роботи деяких споживачів (випрямлячів, блоків управління частотою обертання двигунів, газорозрядних і люмінесцентних ламп), наявності постійно виникаючих перехідних процесів (при включенні-відключенні споживачів в мережу) або наводиться ззовні (електромагнітні поля електроспоживачів, стільникових мереж та ін.). В цьому випадку є два способи відбудови від перешкод: апаратний і програмний.

Апаратним способом фільтрації перешкод є використання, наприклад, смугових фільтрів, що виключають сигнали з діапазону частот невластивого для спектра часткових розрядів.

Програмними засобами фільтрації перешкод є:

- Вейвлет-перетворення [21,22,27-30];
- Використання нейронних мереж [28,31,32];
- Системи розпізнавання образів [33-35];
- Фрактальний аналіз [22];

Також однією з розроблюваних в даний час проблем є визначення місця розташування джерела часткових розрядів, для цих цілей зазвичай використовують такі методи:

- Використання електромагнітних датчиків;
- Використання акустичних датчиків;
- Аналіз коефіцієнтів кореляції [36];
- Використання вейвлет-перетворень в сукупності з нейронної мережею [28];
- Методи математичної морфології [29,37];
- Аналіз потужності спектрального складу електричного сигналу [38]
- Аналіз енергетичних діаграм для визначення типу джерела ЧР [39].

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

Крім цього, додаткові складності при визначенні характеристик часткових розрядів створює можливість виникнення відразу декількох джерел ЧР в одному контрольованому елементі. Для визначення кількості джерел ЧР і їх типу можуть застосовуватися такі методи:

- Використання акустичних датчиків [40];
- Використання теорії нечітких множин [41];
- Використання нейронних мереж [32].

Крім того, актуальним залишається питання реєстрації характеристик часткових розрядів в екранованих силових кабелях [42], в низьковольтних кабелях [43], при наявності постійної складової в сигналі змінного напруги [44].

Аналіз динаміки зміни характеристик часткових розрядів в часі використовується для оцінки стану ізоляції і її залишкового ресурсу. Так в [45] запропонована методика визначення передпробивного стану ізоляції в залежності від зміни потужності часткових розрядів, відзначається, що при збільшенні розмірів дефекту потужність ЧР зростає, потім слідує невеликий її спад, після чого відбувається критичне збільшення потужності ЧР, що приводить до пробою ізоляції.

1.3.3 Джерела часткових розрядів

Джерелами ЧР високої інтенсивності зазвичай є дендрити – деревовидні канали неповного пробою [46], що розвиваються з неоднорідностей, утворюються в ізоляції при виготовленні (бульбашки газів діаметром 1...30 мкм, що утворюються при вулканізації поліетилену [47], твердотільні домішки) і в 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.

Усередині дефектів ізоляції, що утворилися як наслідок недоліків технології виготовлення, в процесі експлуатації під впливом електричного поля виникають часткові розряди, викликаючи зростання дендритів. Для заповнених газами дефектів суттєвим є той факт, що для виникнення часткових розрядів в газових

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

включеннях потрібна менша напруженість електричного поля, так як діелектрична проникність газів менше, ніж проникність рідин і твердих домішок [48]. Як наслідок інтенсивність часткових розрядів може бути істотно вищою на початкових стадіях розвитку дефекту.

Мікропори в ізоляції можуть бути заповнені водою, наявною в ізоляції у вигляді розчину (відомо, що в будь-якому матеріалі є хоча б невелика кількість води) або проникаючої вологи в ізоляцію з навколишнього середовища. Наявність води в ізоляції може призвести до утворення дендритів, канали яких будуть заповнені водою. У цьому випадку має місце явище, зване водним триінгом [47]. Незважаючи на більш високу діелектричну проникність води, це явище в деяких випадках може бути навіть більш небезпечним, ніж в разі заповнення каналів дендрита газами.

При виникненні часткових розрядів в заповнених водою каналах дендрита виникають явища, так звані електрогідравлічним ефектом або ефектом Юткіна [49].

Електрогідравлічний ефект полягає в тому, що при виникненні електричного розряду в рідині мають місце потужні гідродинамічні імпульси. Вплив цих імпульсів на стінки каналів водного триінга істотно прискорює ріст дендрита, що може значно скоротити час розвитку дефекту до повного пробою ізоляції.

Додатковим негативним фактором наявності водного триінга в ізоляції є той факт, що при проведенні випробувань ізоляції постійною напругою в водних проміжках може накопичуватися об'ємний заряд, що прискорює розвиток дефектів в ізоляції.

Дослідження процесів росту дендритів і водних триінгів в ізоляції дозволить підвищити ефективність аналізу сигналів часткових розрядів [50].

Вважається, що з вигляду сигналів ЧР можна визначити стадію зростання дендрита. Відповідне дослідження описано в [51]: автор роботи пропонує визначати стадію зростання дендрита шляхом аналізу симетричності появи ЧР в позитивної та негативної напівхвилях і по згладженні піку сигналу ЧР (на ранній

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

стадії зростання дендрита вершини згладжені і немає симетрії, на пізніх стадіях, що свідчать про наближення пробою, є симетрія, вершини загострені).

1.3.4 Обладнання для реєстрації і аналізу характеристик часткових розрядів в кабельних лініях

В даний час існує досить великий спектр обладнання для діагностики і контролю стану ізоляції електрообладнання на основі характеристик часткових розрядів як стаціонарного так і мобільного, рис. 1.4

а)



б)

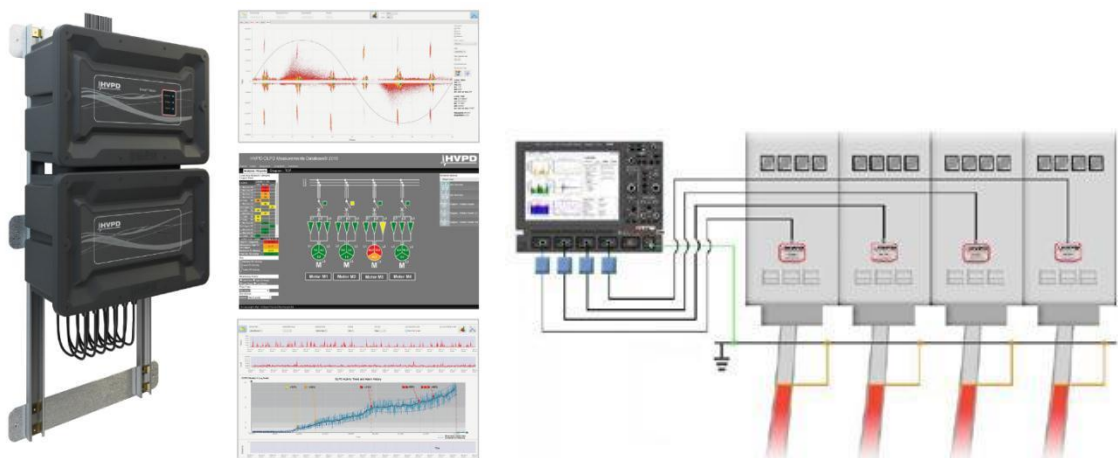


Рисунок 1.4 – Засоби мобільного (а) та стаціонарного (б) моніторингу стану ізоляції електрообладнання

1.4 Вимірювання тангенса кута діелектричних втрат

Діелектричні втрати – це розсіювання електричної енергії в діелектрику при впливі на нього змінної напруги, обумовлене процесами провідності і поляризації, що розвивається із затримкою по часу.

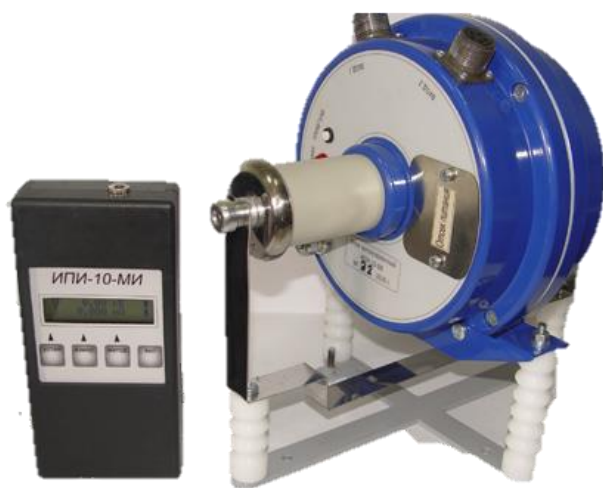
Величина тангенса кута діелектричних втрат ($\operatorname{tg} \delta$), яка визначає діелектричні втрати в ізоляції на змінній напрузі, є однією з найпоширеніших характеристик, значення якої використовується для оцінки якості та стану електроізоляційного матеріалу [52-54].

Дефектами в ізоляції, як правило, є газові і твердотільні мікровключення, електрична міцність яких значно менше електричної міцності ізоляційного матеріалу. Отже, виникнення такого дефекту в ізоляції зменшує електричну міцність всієї ізоляційної конструкції в цілому. Наслідком цього зазвичай є збільшення активної складової струму в ізоляції, що можна зафіксувати по збільшенню тангенса кута діелектричних втрат.

При оцінці стану ізоляції вимір величини $\operatorname{tg} \delta$ має наступні переваги, порівняно з вимірюванням абсолютних значень активної і реактивної складових струмів або потужності втрат:

- 1) Величина $\operatorname{tg} \delta$ не залежить від розмірів об'єкта, але дозволяє виявити виникаючі в ізоляції дефекти;
- 2) Величина $\operatorname{tg} \delta$ може бути безпосередньо виміряна (наприклад пристроєм ИПИ-10, ИПИ-100) рис. 1.5.[7,8].

а)



б)



а) ИПИ-10; б) ИПИ-100

Рисунок 1.5 – Пристрої для вимірювання $\operatorname{tg} \delta$

Крім того, за допомогою вимірювання тангенса кута діелектричних втрат визначається відносна зволоженість ізоляції: проводять вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ на частотах 2 Гц і 50 Гц. Потім перевіряють співвідношення ємностей, і, якщо ємність ізоляції при 2 Гц перевищує ємність при 50 Гц в 1,3 рази або більше, таке зволоження вважається неприпустимим для введення ізоляції в експлуатацію.

1.5 Оцінка стану ізоляції по процесам поляризації/деполяризації

Основними характеристиками, що піддаються аналізу при визначенні деполяризаційної характеристики ізоляції, є зворотня напруга і коефіцієнт (струм) абсорбції.

При аналізі обох характеристик мається на увазі заряд ізоляції постійною напругою значно менше номінального, що в деяких випадках може викликати утворення об'ємного заряду в полімерній ізоляції, проте в [56] відзначається, що використання напруг 250 В, 500 В 1000 В не може викликати утворення об'ємного заряду, здатного зробити істотний вплив на електричну міцність і працездатність кабелю, не впливаючи при цьому на точність проведення вимірювань.

Вимірювання зворотної напруги проводиться таким чином [56]: спочатку ізоляція підключається до регульованого джерела постійної напруги для її заряду, після чого на 1, 2 або 3 секунди ізоляція жила і екран замикаються накоротко, потім ключ розмикається і відбувається осцилографування сигналу напруги на ізоляції. Отримана характеристика зворотної напруги дозволяє проаналізувати ступінь старіння ізоляції. Наявність локальних пошкоджень ізоляції вносять істотні зміни в форму кривої зворотної напруги.

Інший спосіб контролю стану ізоляції – через контроль коефіцієнта абсорбції. Для визначення коефіцієнта абсорбції, як і для аналізу поворотного напруги, ізоляцію заряджають постійною напругою, проте на відміну від аналізу зворотної напруги, аналізується процес поляризації діелектрика.

Після подачі постійної напруги на ізоляцію на основі величини абсорбційного струму визначають опір ізоляції через 15 секунд і через 60. Після чого обчислюють коефіцієнт абсорбції за формулою:

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$k_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (1.1)$$

За коефіцієнтом абсорбції судять про ступінь зволоженості і якості ізоляції. При $k_{abc} < 1,3$ ізоляція вважається неприпустимо зволоженою і необхідно провести її сушку, або ізоляція виробила свій ресурс і потребує повної або часткової заміни.

Вимірювання опору ізоляції зазвичай проводиться за допомогою контрольно-вимірювальної техніки, найбільш поширеними з яких електронні мегомметри (рис.1.6).

а)



б)



Рисунок 1.6 – Мегометри MIC-2500 (а) та CA 6555 (б)

Головним недоліком цього методу контролю стану ізоляції є неможливість проводити вимірювання під навантаженням через необхідність прикладення постійної напруги. Отже, немає відомих технічних рішень з моніторингу цього параметра. Таким чином, для контролю стану ізоляції цим методом необхідно проводити періодичний контроль параметра персоналом.

1.6 Тепловізійна, ультрафіолетова і рентген-діагностика стану ізоляції

Метод тепловізійної діагностики [12,57] електрообладнання отримав широке поширення для визначення місця розташування дефектів в ізоляції ліній електропередачі. Якщо відомо про наявність дефекту в ізоляції, наприклад,

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

джерела часткових розрядів, його місце розташування можна визначити по відносно високому локальному нагріванню ізоляції, викликаного протіканням струмів. Відомо, що, при наявності дефекту в ізоляції, температура на її поверхні може перевищувати температуру незруйнованих ділянок в 1,5...2 рази [58].

Зазвичай тепловізійна діагностика використовується для пошуку дефектів в ізоляції ліній електропередачі в тому випадку, коли вже відомо про наявність дефекту і навіть, можливо, відомо приблизне його місце розташування (ця інформація може бути отримана, наприклад, з використанням засобів моніторингу характеристик часткових розрядів). У цьому випадку проводиться обстеження ділянки лінії з передбачуваним дефектом ізоляції за допомогою тепловізора (рис. 1.7), і за отриманою термокартиною проводиться пошук локального нагріву ізоляції, що свідчить про наявність в ньому дефекту.

Крім цього, тепловізійна діагностика може використовуватися для оцінки ступеня нагріву ізоляції ЛЕП з метою підвищення її пропускної спроможності та запобігання перегрівів.

Також для пошуку дефектів в ізоляції ліній електропередачі використовують ультразвукову дефектоскопію (рис. 1.7), суть якої полягає в просвічуванні ізоляції за допомогою ультразвуку та пошуку дефектів. Наприклад, дослідження, описане в [60], показало, що цей метод дозволив знайти дефект в ізоляції розміром 1 мм. Однак відомо [61], що ультразвукова дефектоскопія може знаходити в ізоляції кабелів водні триінги, які за розмірами можуть бути набагато менше 1 мм.

Головною перевагою цього способу пошуку дефекту є можливість точного визначення місцезнаходження дефекту для проведення ремонту пошкодженої ділянки. Основним же недоліком методу є необхідність попереднього пошуку місцезнаходження дефекту акустичним або електромагнітним методом.

Також для пошуку дефектів в ізоляції кабелів використовується рентгенодефектоскопія (рис. 1.7), яка полягає в просвічуванні ізоляції рентгенівськими променями і пошуку дефектів на отриманих зображеннях.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтенсивність рентгенівських променів залежить від товщини досліджуваного об'єкта, таким чином, наявність дефектів в ізоляції вносить зміни в отриману картину і дозволяє здійснювати пошук пошкоджених ділянок ізоляції.

а)



б)



в)



Рисунок 1.7 – Тепловізор (а), ультразвуковий дефектоскоп (б) та рентген-апарат (в)

1.7 Рефлектометрія

Попередня локалізація місця пошкодження ізоляції може виконуватися за допомогою методу імпульсної рефлектометрії або методу відображених імпульсів [61]. Суть методу полягає в подачі на кабельну лінію низьковольтних коротких імпульсів і аналізі відбитих сигналів, по на підході до яких може визначити тип пошкодження (ураження електричним струмом чи обрив). Значним недоліком цього методу є складність аналізу відбитого імпульсу внаслідок змісту гармонік в випромінюваному імпульсі.

Для підвищення точності вимірювання може використовуватися імпульс складної форми або вейвлет-імпульс [3]. Більш перспективним в діагностиці кабельних ліній є метод високочастотної рефлектометрії, що полягає в аналізі залежності входного опору від частоти напруги, і дозволяє здійснювати пошук місця розташування розподілених дефектів [3], наприклад, дендритів, що утворилися як наслідок впливу часткових розрядів.

Крім того, в деяких випадках необхідно проводити моніторинг температури ізоляції, для чого може застосовуватися метод оптичної рефлектометрії, що дозволяє визначати температуру кожної ділянки кабельної лінії з точністю до 1 м і

1 °C [3]. Однак для використання оптичної рефлектометрії потрібна наявність оптоволоконної жили в кабелі. Таким чином, використання методу рефлектометрії дозволяє з достатнім ступенем точності здійснювати попередній пошук місця пошкодження кабельних ліній. Додатковою перевагою цього методу є можливість його використання без відключення споживачів.

Загальноприйняті випробування ізоляції підвищеною напругою є руйнівними для ізоляції і можуть привести до швидкого виходу кабелю з ладу, в зв'язку з цим, актуальним є питання розробки неруйнівних методів для контролю стану ізоляції.

Недолік всіх перерахованих способів контролю стану ізоляції полягає в тому, що всі вони застосовуються для визначення предпробійного стану ізоляції або для пошуку місця ушкодження, однак цими способами не можна визначати залишковий ресурс ізоляції.

Методи просвічування ізоляції, дистанційного пошуку джерела ЧР (електромагнітного, акустичного) і тепловізійну дефектоскопію важко використовувати для пошуку дефектів в ізоляції при прокладанні кабелів під землею. В цьому випадку потрібний додатковий інструмент визначення місця розташування дефекту, наприклад, на основі аналізу ЧР або за допомогою високочастотної рефлектометрії.

Методи високочастотної рефлектометрії дозволяють досить точно визначати місце розташування дефекту, проте при використанні цього методу без відключення навантаження збільшиться зміст вищих гармонік в мережі, а також можливі спотворення відображених сигналів, так як в мережі завжди присутні їх високочастотні складові;

Основним недоліком всіх перерахованих способів контролю стану ізоляції є необхідність аналізу даних персоналом для оцінки стану ізоляції, тому найбільш актуальним зараз є дослідження по автоматизації визначення залишкового ресурсу і предпробійного стану ізоляції.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВІВ НА ІЗОЛЯЦІЮ КАБЕЛІВ ІЗ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ

2.1 Аналіз впливів на ізоляцію кабелів

В процесі експлуатації кабельних ліній електропередачі з ізоляцією з зшитого поліетилену ізоляційний матеріал може піддаватися ряду зовнішніх і внутрішніх руйнівних впливів, що призводять до його старіння [4...6,62...64]:

Часткові розряди в ізоляції – локальні електричні розряди, які шунтують тільки частину ізоляції в електроізоляційної системі, викликані впливом електромагнітного поля високої напруженості;

1. Температурний вплив визначає швидкість протікання хімічних реакцій деструкції і деполімеризації [62] зшитого поліетилену;

2. Підвищена вологість навколишнього середовища може викликати зволоження ізоляції і погіршувати її властивості. Для визначення ступеня зволоженості визначається коефіцієнт абсорбції і, при необхідності, проводять сушку ізоляції.

Крім цього, вміст води в мікропорах ізоляційного матеріалу викликає явище водного триінга, що прискорює розвиток дефектів в ізоляції.

3. Ультрафіолетове випромінювання має руйнівний вплив на поверхню ізоляції, так як фотони ультрафіолетового діапазону мають високу енергією і руйнують молекулярну структуру ізоляції на її поверхні, призводять до підвищення твердості ізоляції, її висушуванню, розтріскування і, таким чином, до погіршення ізоляційних властивостей. Це явище ще називають фотохімічною деструкцією [62];

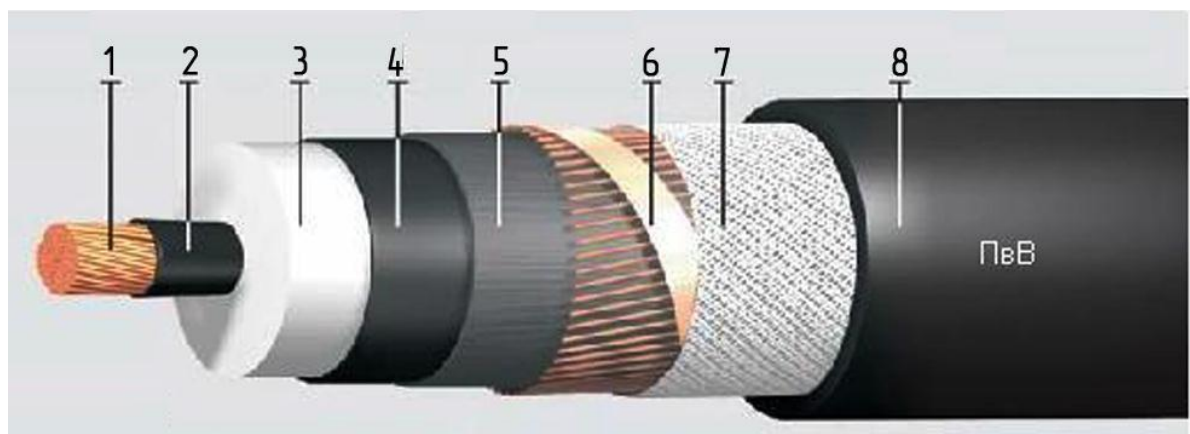
4. Хімічний вплив виражається в різноманітні хімічних речовин, які можуть впливати на ізоляцію і руйнувати її, наприклад, азотну кислоту, здатну руйнувати поліетилен в 50% розчині, або наявність кисню з повітря, що приводить до термоокислювальної деструкції.

5. Механічні дії викликають руйнування міжатомних зв'язків при виникненні механічної напруги вище енергії зв'язків атомів [62].

6. Дія радіації на діелектрик може призводити до різних пошкоджень на молекулярному рівні. Відбувається зміни структури, властивостей, стану речовини. Носії заряду, які утворюються в речовині що опромінюється, створюють стаціонарні і нестаціонарні струми і призводять до накопичення об'ємного заряду в діелектриках, який може зберігатися протягом тривалого часу [65].

Однак розробка системи моніторингу всіх перерахованих факторів є досить складним завданням з огляду на необхідність глибокого вивчення природи всіх перерахованих впливів на ізоляцію. Крім того, потрібно розробляти індивідуальний підхід до моніторингу залишкового ресурсу кожного конкретного кабелю, так як вплив деяких факторів на ізоляцію може бути незначним, відповідно, ним можна знехтувати.

Для визначення чинників, що впливають на ізоляцію кабелів, потрібно проаналізувати їх конструкцію (рис. 2.1).



1 – алюмінієва або мідна струмопровідна жила, 2 – напівпровідний шар з зшитого полімерної композиції, 3 – ізоляція з зшитого поліетилену; 4 – напівпровідний шар з зшитого полімерної композиції; 5 – шар з електропровідного водоблокуючої стрічки; 6 – екран з мідних дротів, скріплених мідною стрічкою, 7 – шар з електропровідних водоблокуючих стрічок; 8 – поліетиленова оболонка

Рисунок 2.1 – Конструкція одножильного кабелю з ізоляцією із зшитого поліетилену

Виходячи з конструкції кабелів, вирішено не враховувати такі фактори руйнування ізоляційного матеріалу:

1. Вологість навколишнього середовища, так як в кабелі є водоблокуючі стрічки, що перешкоджають зволоженню кабелів, а також відомо, що поліетилен володіє відносно низьким вологопоглинанням [66].

2. Ультрафіолетове випромінювання, так як воно завдає руйнівного впливу 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 впливи вирішено не розглядати окремо, так як всі хімічні речовини можуть бути в обсязі ізоляції в невеликому кількості або утворюватися в результаті руйнування ізоляційного матеріалу, отже, будуть визначатися процесами термічної деструкції, що викликається нагріванням струмопровідної жили в режимі експлуатації кабелю.

4. Механічні дії виражаються в вигинах (при прокладці), стисканнях і розтягненнях кабелів, викликаних перепадами температури і зміщенням ґрунту (при прокладці в землі).

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

Таким чином, виходячи з аналізу конструкції кабелів і впливів, яким їх ізоляція може піддаватися, досить враховувати процеси старіння від впливу температури і часткових розрядів, що викликаються наявністю електричного поля високої напруженості.

2.2 Аналіз відомих результатів дослідження процесів старіння ізоляції

Відомо досить багато робіт, присвячених оцінці ступеня зносу ізоляції та її старінню [67-75].

Метою роботи є розробка способу визначення залишкового ресурсу ізоляції із зшитого поліетилену кабельних ліній, для чого необхідно використовувати

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

математичну модель її старіння. В даний час відомі наступні моделі старіння ізоляції, серед яких [4...6,76...82]:

1. Модель старіння ізоляції Журкова, розроблена в 1960-і, згідно якої термін служби твердого матеріалу можна розрахувати за формулою [81,82]:

$$\tau_{cl} = \tau_0 \exp \left[\frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT} \right] \quad (2.1)$$

де τ_0 , U_0 , γ – константи, які залежать від структури матеріалу та які визначаються експериментальним шляхом;

σ – розтягуюче напруження;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура.

Однак в первісному вигляді цю модель можна використовувати для розрахунку терміну служби ізоляції силових кабелів, тому були запропоновані уточнення в модель для обліку впливу температури і електричного поля [78]:

$$\tau_{cl} = \tau_0 \exp \left(\frac{w - \chi E}{RT} \right) \quad (2.2)$$

де τ_0 – значення терміну служби, коли ступеневий вираз прагне до одиниці;

w – енергія активації структурного пробою;

R – універсальна газова постійна;

χ – структурний параметр;

E – напруженість електричного поля;

T – абсолютна температура.

2. Модель старіння ізоляції Крайна, запропонована в кінці 1990-х, по якій термін служби розраховується за формулою [76,80]:

$$\tau_{cl} \cong \frac{h}{2kT} \exp \left(\frac{\Delta G}{kT} \right) \operatorname{csch} \left(\frac{e \delta E}{kT} \right) \quad (2.3)$$

де h – постійна Планка;

k – постійна Больцмана;

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

T – абсолютна температура,
 ΔG – енергія активації Гіббса;
 e – заряд електрона, прискореного електричним полем з напруженістю E на дистанції δ .

Однак пізніше Крайн переглянув свою модель і запропонував розраховувати термін служби ізоляції виходячи з обсягу активації, а не відстані, як було запропоновано раніше [79]:

$$\tau_{cl} \cong \frac{h}{2kT} \exp\left(\frac{\Delta G - \varepsilon \varepsilon_0 \Delta V E^2 / 2}{kT}\right) \quad (2.4)$$

де ε , ε_0 – відносна і абсолютна діелектрична проникність матеріалу;

ΔV – об'єм активації, в якому діє електричне поле напруженістю E .

3. Комбінована модель на основі моделі старіння від температури Арреніуса і зворотного ступеню моделі [78]:

$$\tau_{cl} = \tau_0 \exp(-BcT) \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-(n_0 - bcT)} \quad (2.5)$$

де E – напруженість електричного поля;

$cT = 1/T_0 - 1/T$ – умовне температурне напруження;

T – абсолютна температура;

T_0 – приблизна контрольна температура (кімнатна температура);

n – коефіцієнт витривалості по напрузі;

E_0 – значення напруженості електричного поля, нижче якого впливом електричного поля можна знехтувати;

τ – термін служби при $T = T_0$, $E = E_0$, $B = \Delta W/k$;

ΔW – енергія активації реакції термічної деградації;

k – постійна Больцмана;

b – параметр, показує синергізм теплової і електромагнітної взаємодій.

4. Модель старіння ізоляції під впливом температури і електричного поля, запропонована Кучинським Г. С. в [4]:

$$\tau_{cl} = AE^{-n} \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right) \quad (2.6)$$

де E – напруженість електричного поля;

W_a – енергія активації;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура;

A – константа, що залежить від структури і властивостей ізоляції;

n – показник ступеня, що залежить від типу ізоляції.

5. Модель старіння тонких полімерних плівок, запропонована в [83]:

$$\tau_{cl} \cong \exp\left[\frac{E_t - aeF}{kT}\right] \quad (2.7)$$

де E_t – глибина пасток в діелектрику;

a – ширина пастки;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура;

e – заряд електрона;

F – напруженість електричного поля.

Для аналізу моделей старіння ізоляції пропонується зіставити результати розрахунку при одних і тих же умовах. Для цього необхідно задати параметри моделювання для кожної з моделей. Модель старіння тонких полімерних плівок вирішено не брати до уваги, так як ізоляційний матеріал не є тонкою плівкою.

Паспортний термін служби кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену становить 30 років. У зв'язку з цим, параметри моделей підбиралися таким чином, щоб при максимально довго допустимій температурі 90 °С термін служби становив близько 30 років.

При цьому аналіз моделей старіння показав, що залежність терміну служби ізоляції від температури і напруженості електричного поля суттєво залежить від коефіцієнтів, що задаються в моделях, які можуть варіюватися в великих межах.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Наприклад, можливий набір коефіцієнтів, при якому залежності співпадуть, що доводиться графіком залежності (рис. 2.2) при параметрах, зазначених в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри моделей старіння ізоляції

Модель С.Н. Журкова		Модель Ж.-П. Крайна	
Параметр	Значення	Параметр	Значення
τ_0 [с]	10^{-3}	ε [Ф/м]	$2.213 \cdot 10^{-11}$
W [кДж/моль]	84	ΔG [Дж]	$2.5555 \cdot 10^{-19}$
χ [кДж мм/(моль кВ)]	0.447	T_0 [К]	293
R [кДж/(моль К)]	$8.314 \cdot 10^{-3}$	ΔV [м ³]	$3.4 \cdot 10^{-23}$
Модель Арреніуса-ОСМ		Модель Г. С. Кучинського	
Параметр	Значення	Параметр	Значення
τ_0 [с]	$2 \cdot 10^3$	A	$5.3 \cdot 10^{16}$
b [К мм/кВ]	200	W [кДж/моль]	84
n_0	16	n	3
E_0 [кВ/мм]	5	R [кДж/(моль К)]	$8.314 \cdot 10^{-3}$
B [К]	10103		

Однак розрахунку залежності терміну служби ізоляції від температури недостатньо, так як напруга на кабелі безперервно змінюється в межах 10% від номінального, а також можуть виникати перенапруги на ізоляції, викликані комутаціями або блискавкою. У зв'язку з цим, необхідно провести розрахунки терміну служби ізоляції в залежності від напруги і температури.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ

3.1 Результати розрахунку терміну служби ізоляції

Для цілей розрахунку терміну служби ізоляції в залежності від напруги і температури використовувався пакет програм Matlab, отримані результати моделювання представлені на рис. 3.1...3.9.

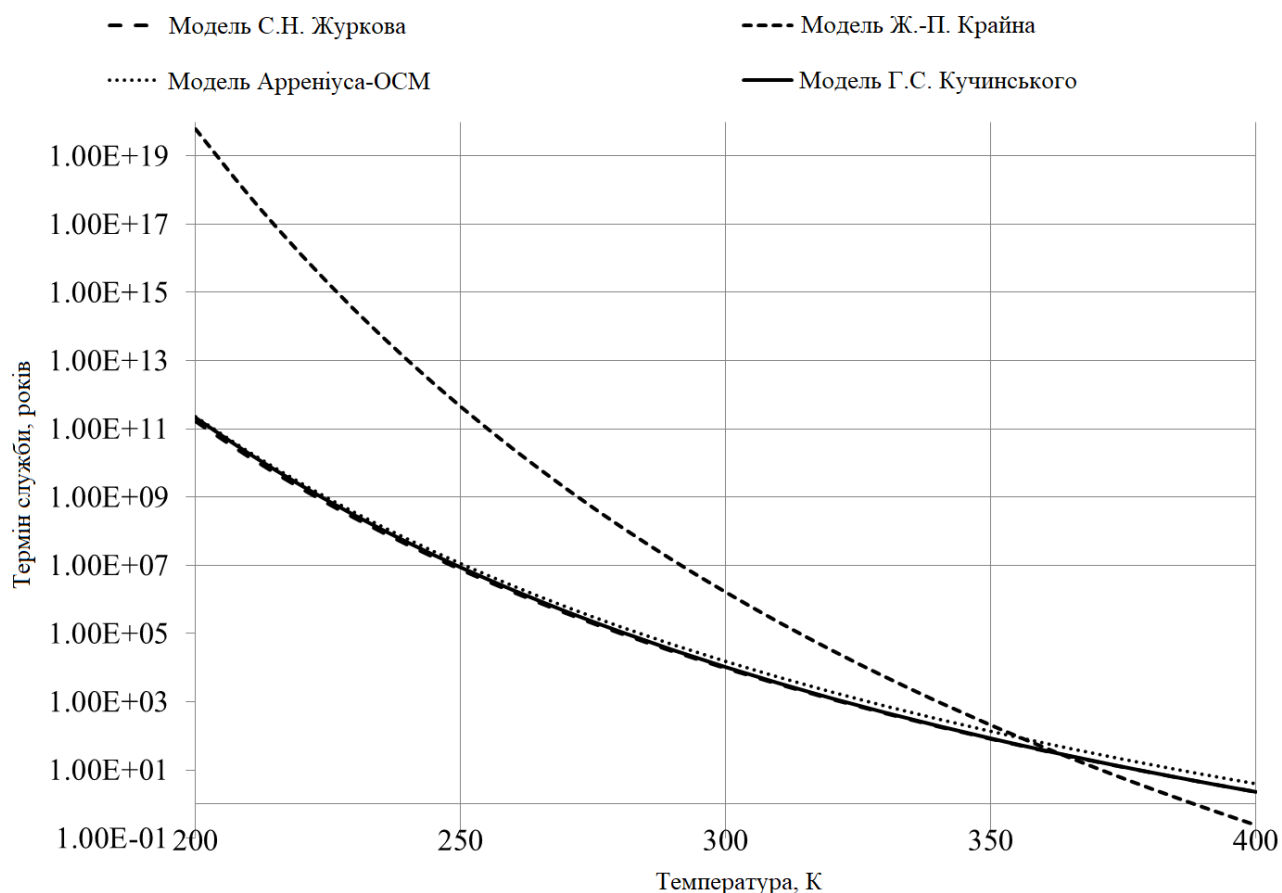


Рисунок 3.1 – Залежності терміну служби ізоляції кабелів із зшитого поліетилену від температури при номінальній напруженості електричного поля при розрахунку за різними моделями старіння ізоляції

Виходячи з отриманих результатів розрахунку, всі перераховані моделі мають попарно схожий характер залежності від температури і напруженості електричного поля, що цілком логічно. Однак для математичного моделювання пропонується вибрати модель старіння ізоляції Г. С. Кучинського, так як вони базуються на обліку енергетичних складових руйнуючих дій, якими є температура

ізоляції (як параметр термічної і термоокислювальної деструкції) і потужність часткових розрядів, яка є функцією від напруженості електричного поля.

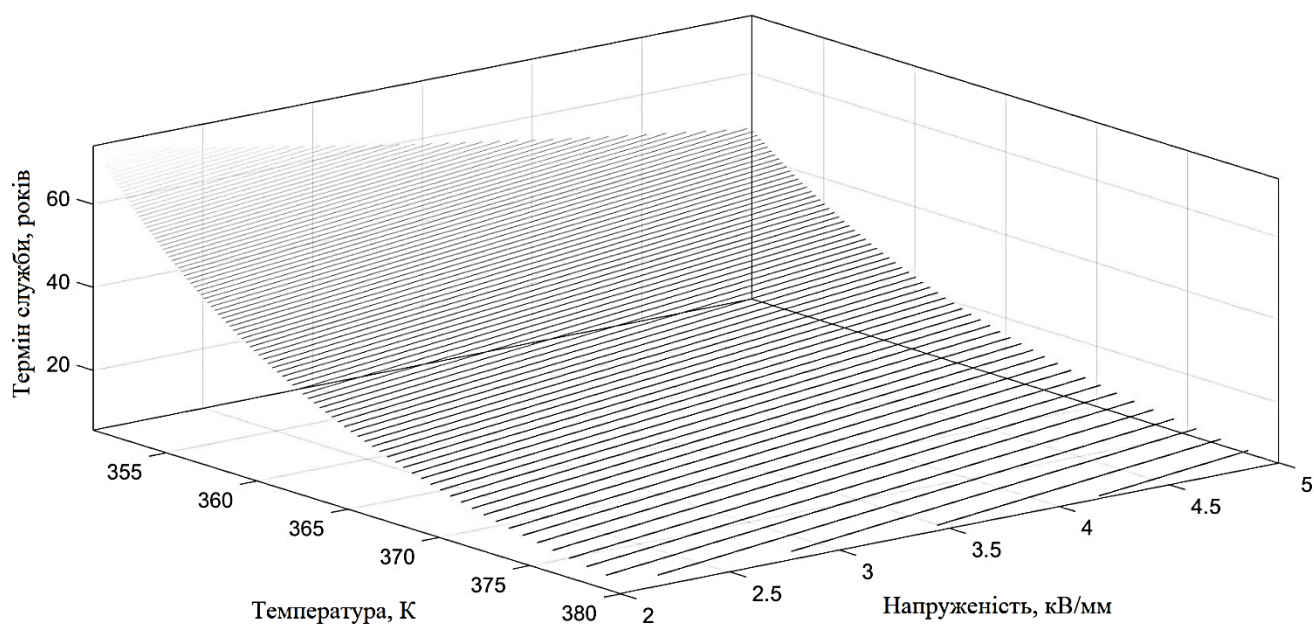


Рисунок 3.2 – Залежність терміну служби від напруженості і температури, згідно моделі С. Н. Журкова

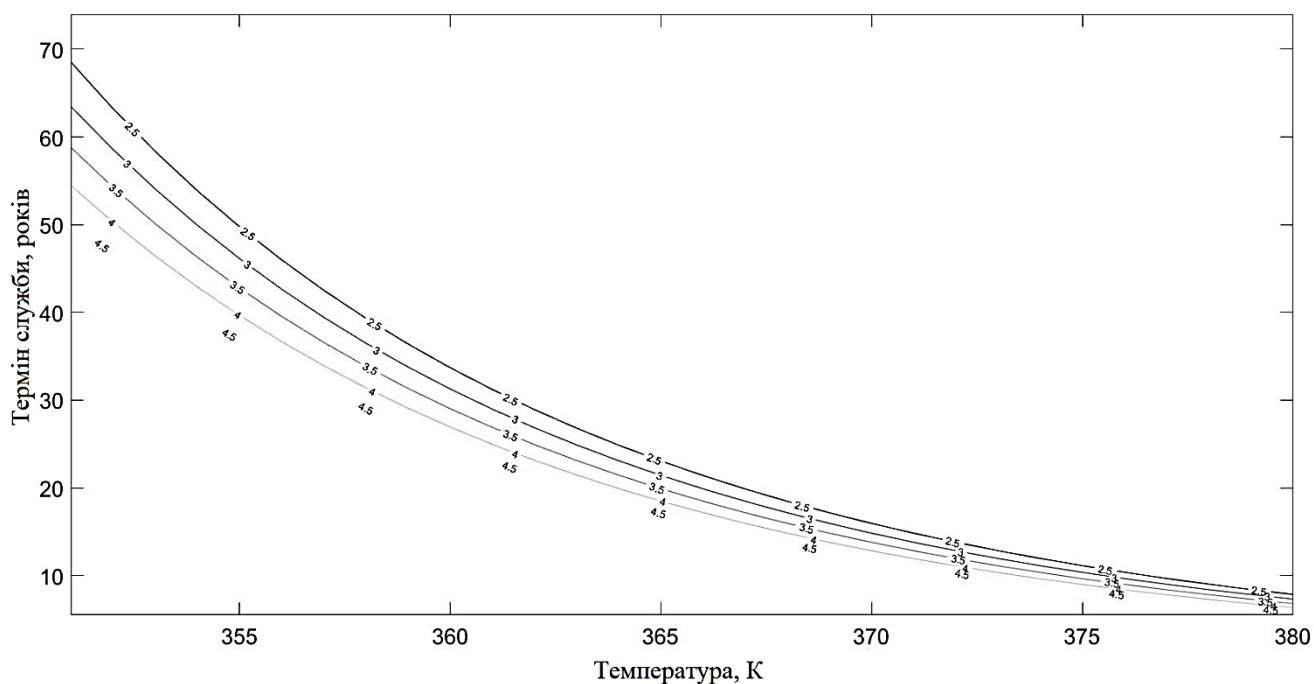


Рисунок 3.3 – Контурна поверхня залежності терміну служби від напруженості і температури, згідно моделі С. Н. Журкова

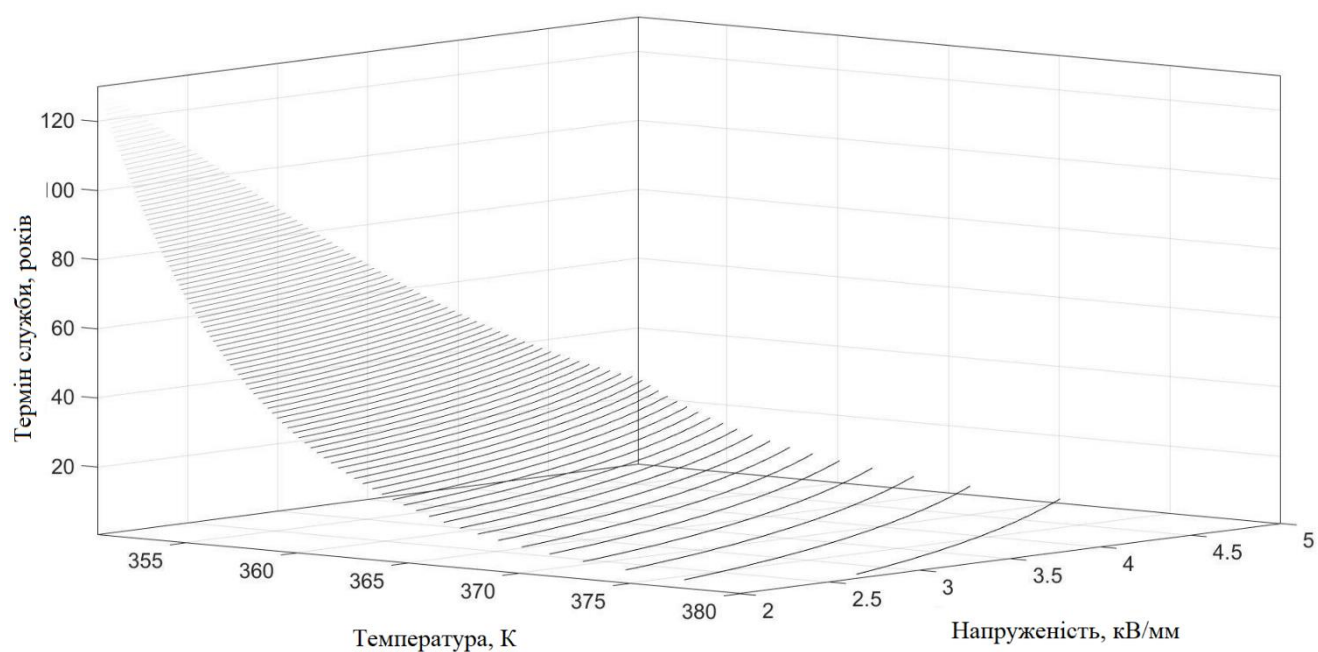


Рисунок 3.4 – Залежність терміну служби від напруженості і температури, згідно моделі Ж.-П. Крайна

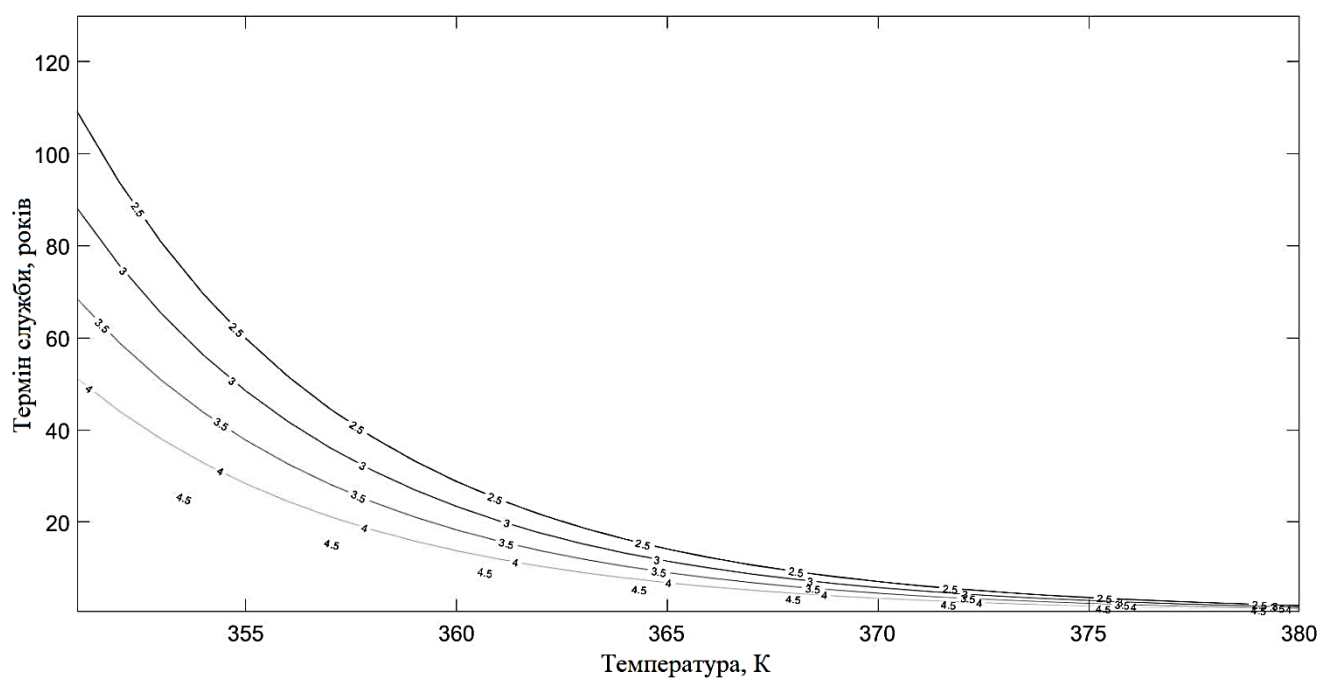


Рисунок 3.5 – Контурна поверхня залежності терміну служби від напруженості і температури, згідно моделі Ж.-П. Крайна

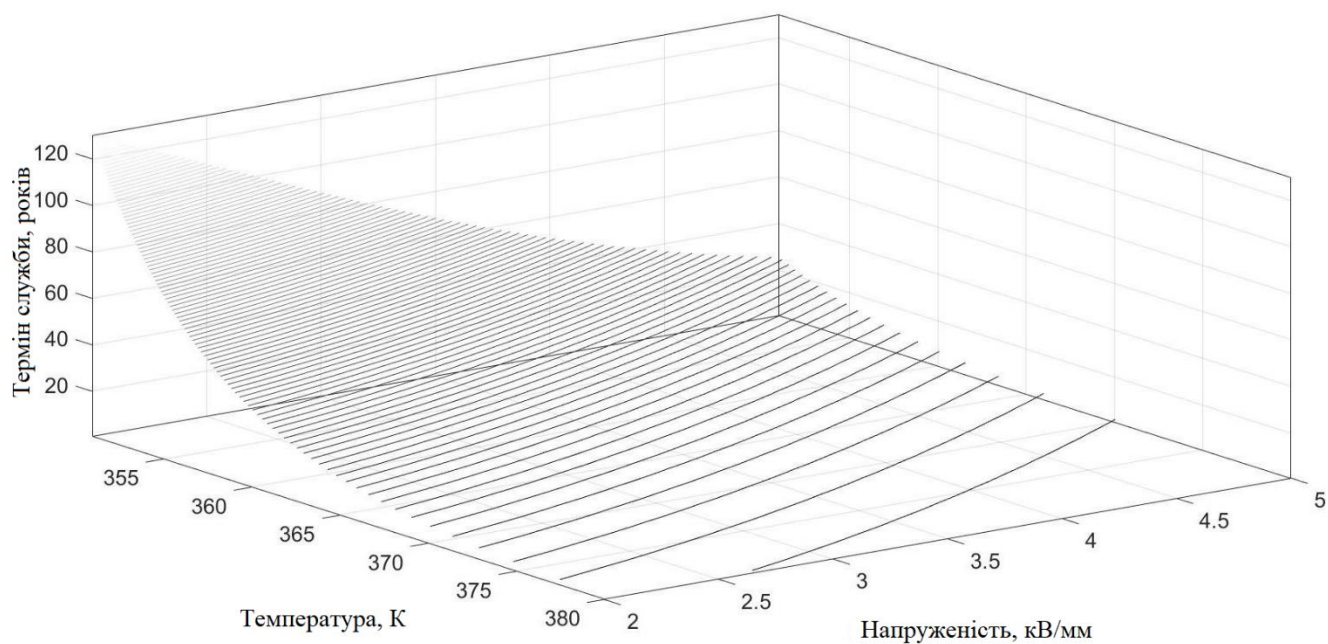


Рисунок 3.6 – Залежність терміну служби від напруженості і температури, згідно моделі Арреніуса-ОСМ

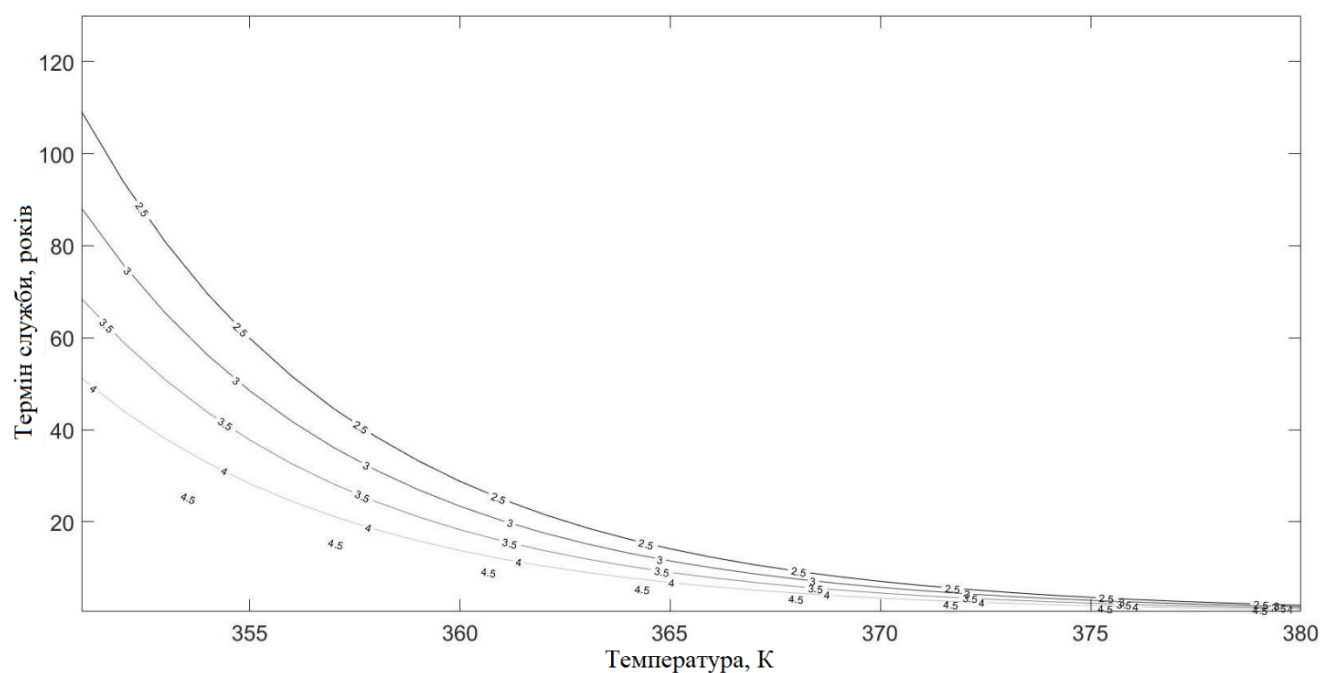


Рисунок 3.7 – Контурна поверхня залежності терміну служби від напруженості і температури, згідно моделі Арреніуса-ОСМ

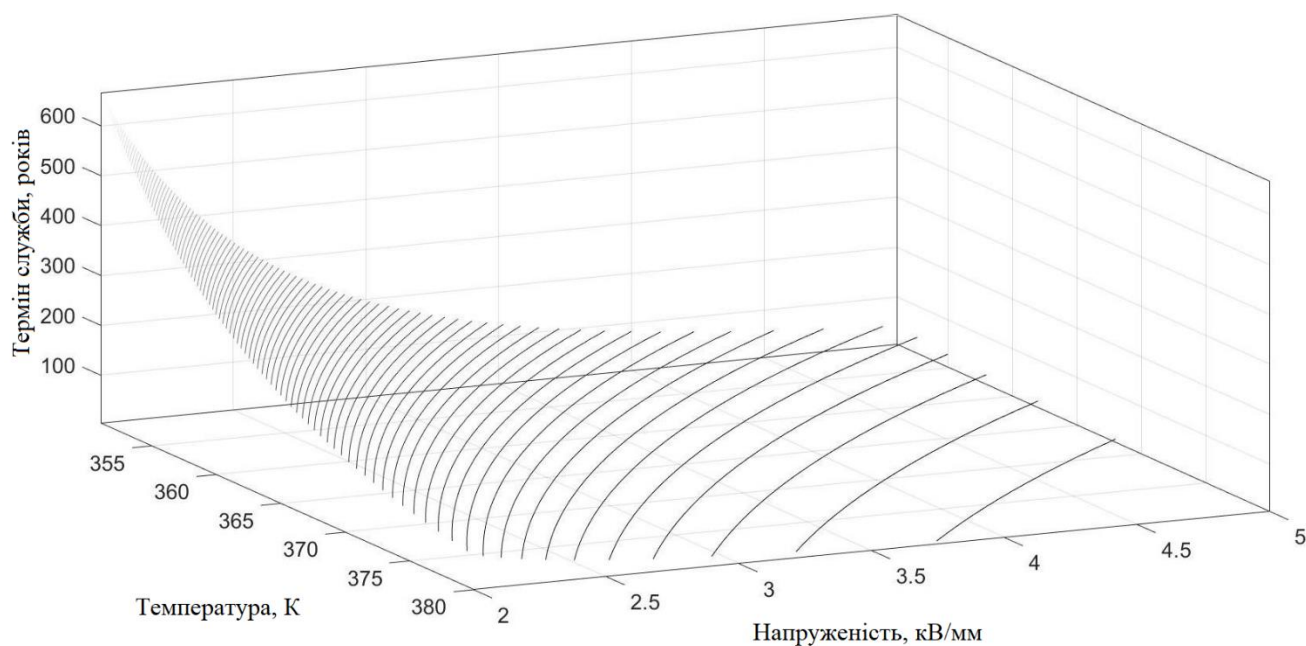


Рисунок 3.8 – Залежність терміну служби від напруженості та температури, згідно моделі Г.С. Кучинського

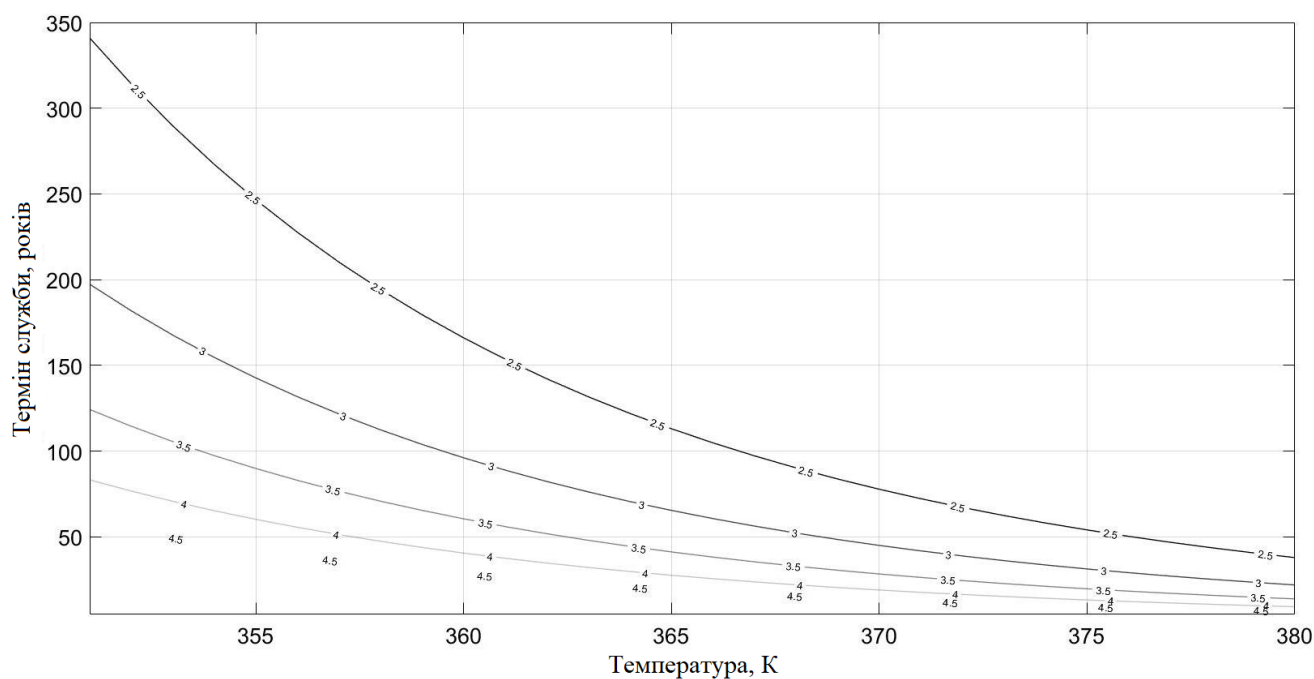


Рисунок 3.9 – Контурна поверхня залежності терміну служби від напруженості і температури, згідно моделі Г.С. Кучинського

Також передбачається внести уточнення в модель старіння ізоляції Г. С. Кучинського при невідповідності результатів експериментальних досліджень з розрахунком і уточнити коефіцієнти A і n для ізоляції кабелів із зшитого

поліетилену для того, щоб модель старіння можна було використовувати для визначення залишкового ресурсу і прогнозувати знос ізоляції.

3.2 Визначення критерію виникнення пробою ізоляції кабелю

Як об'єкт дослідження вирішено використовувати одножильний коаксіальний кабель на напругу 10 кВ марки АПвПуг 1х70/35 мм². Усі розрахунки і моделювання проводилися для зазначеного кабелю. Переріз кабелю представлено на рис. 3.10.

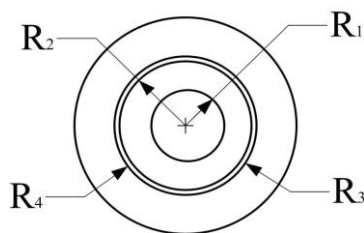


Рисунок 3.10 – Перетин кабелю

Для кабелю обраної марки розміри складають: $R_1 = 4,72$ мм, $R_2 = 8,52$ мм, $R_3 = 9,15$ мм, $R_4 = 14,3$ мм. Геометрія кабелю, побудована в програмному комплексі Elcut 5.6 представлена на рис. 3.11.

Конструкція кабелю така, що він представляє собою циліндричний конденсатор. Відомо, що напруженість електричного поля в діелектрику циліндричного конденсатора при $R_1 < r < R_2$ може бути розрахована за формулою:

$$E(r) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (3.1)$$

де E – напруженість електричного поля;

τ – лінійна щільність заряду конденсатора;

ϵ і ϵ_0 – відносна і абсолютна діелектрична проникність відповідно;

r – радіус.

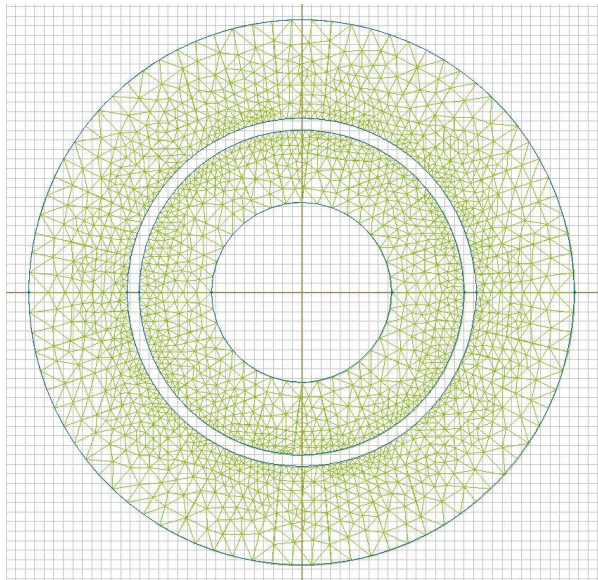


Рисунок 3.11 – Геометрія кабелю в Elcut 5.6

Однак лінійна щільність заряду невідома при комп'ютерному моделюванні. Відомою величиною є напруга на ізоляції. У зв'язку з цим, формула (2.8) повинна бути перетворена. Відомо, що лінійну щільність заряду можна розрахувати за формулою:

$$\tau = C \cdot U \quad (3.2)$$

де U – напруга;

C – ємність конденсатора.

Ємність циліндричного однослойного конденсатора розраховується за формулою:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (3.3)$$

де l – довжина конденсатора.

Тоді, підставивши розрахунок за формулами (3.3) і (3.2) в (3.1), отримаємо, що напруженість електричного поля в ізоляції кабелю буде мати залежність від напруги і радіусу за формулою:

$$E(r) = \frac{U}{\ln\left(\frac{R_э}{R_{жс}}\right)r} \quad (3.4)$$

Для визначення критерію виникнення пробою ізоляції необхідно задати миттєве значення напруги, при якому найбільш ймовірно відбудеться пробій. З огляду на швидкоплинність процесу пробою ізоляції при виникненні лавини електронів в області пробою, напруга в момент пробою можна вважати незмінним. При цьому природно, при виникненні дуги, напруга почне швидко зменшуватися в області пробою.

З огляду на те, що на напруженість електричного поля суттєво впливає тільки миттєве значення напруги, логічно припустити, що пробій ізоляції відбудеться при нарузі, близькій до амплітудного значення. Клас напруги обраного кабелю – 10 кВ. проте слід врахувати, що кабель одножильний, і кабелі з ізоляцією із зшитого поліетилену з'єднуються по схемою «зірка».

Отже, чинне значення напруги, що прикладається до ізоляції, складе 5,7 кВ, а амплітуда напруги – 8,16 кВ. Прийmemo для розрахунку напругу, що становить 95% від номінальної, тобто 7,76 кВ.

Виходячи з розмірів кабелю, при нарузі 7,76 кВ напруженість електростатичного поля в ізоляції кабелю буде мати залежність від радіуса, представлену на рис. 3.12.

Також, крім розрахунку, було проведено моделювання електричного поля в ізоляції кабелю з використанням програми Elcut 5.6. Результати моделювання представлені на рис. 3.13 (картина електростатичного поля в ізоляції кабелю) і рис. 3.14 (розподіл напруженості електричного поля в ізоляції кабелю при віддаленні від центру кабелю). Робота програми Elcut ґрунтується на застосуванні методу кінцевих елементів для розрахунку електричних, магнітних і теплових полів.

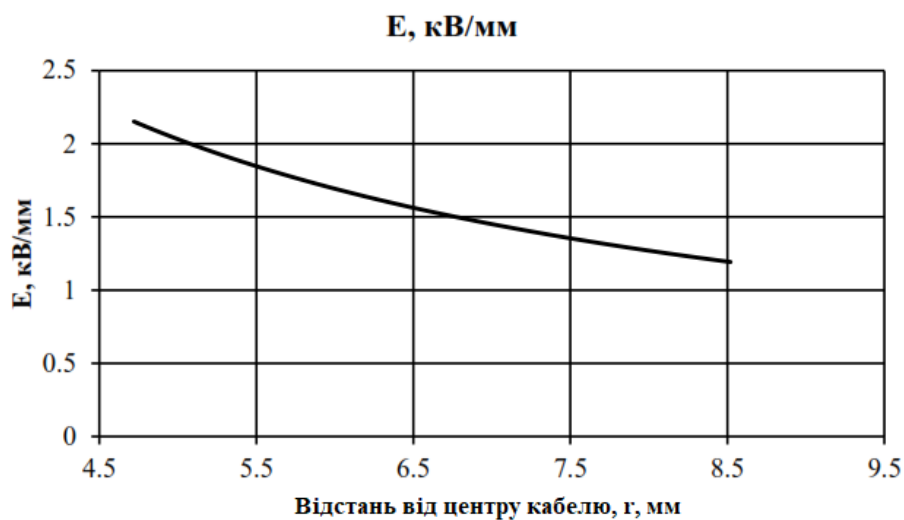


Рисунок 3.12 – Залежність напруженості електричного поля в ізоляції кабелю від відстані від центру кабелю

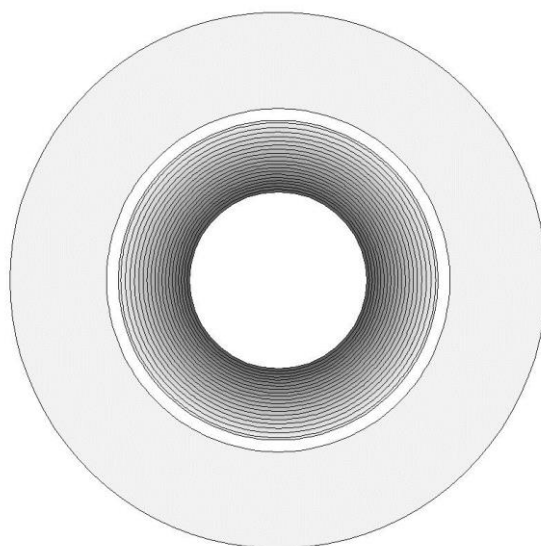


Рисунок 3.13 – Картина розподілу електростатичного поля в ізоляції кабелю

Наступним кроком при визначенні критерію виникнення пробою ізоляції є розрахунок розподілу електростатичного поля в діелектрику з дефектом. Для завдання розрахунку електричного поля з дефектом немає аналітичного рішення. В даному випадку розрахунок електричного поля зводиться до чисельних методів, одним з яких є метод кінцевих елементів, реалізований в Elcut 5.6.

Як умова виникнення пробою використовується умова виникнення в ізоляції напруженості електричного поля вище пробивний. Важливо враховувати фактор старіння ізоляції кабелів в процесі експлуатації.

Виходячи з цього, в якості пробивний напруженості вирішено використовувати величину $E_{пр} = 6 \text{ кВ / мм}$, яка була визначена в [47] для кабелю з поліетиленовою ізоляцією після восьми років в експлуатації.

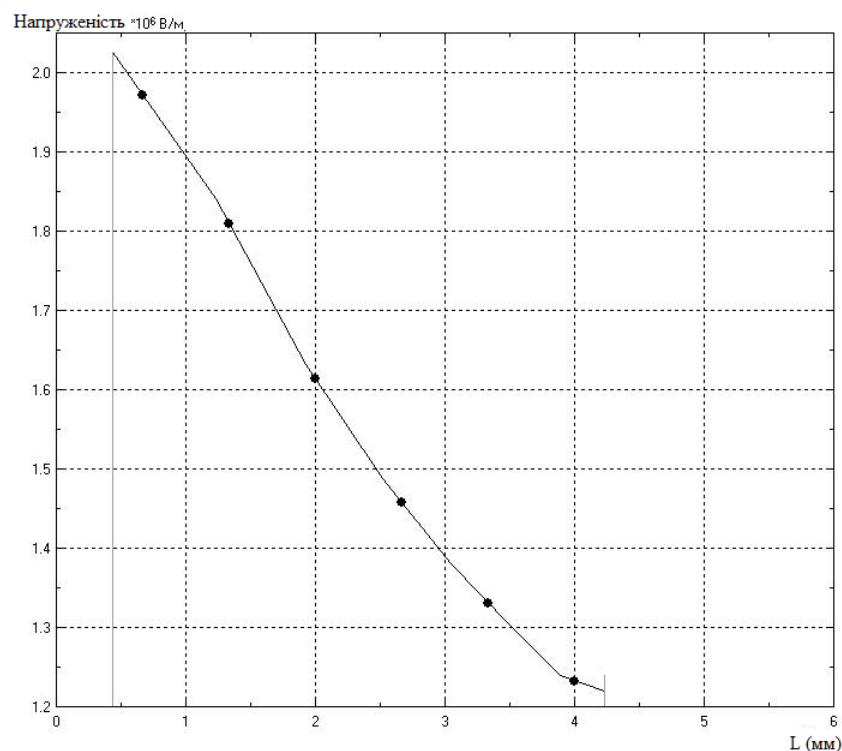


Рисунок 3.14 – Розподіл напруженості електричного поля в ізоляції кабелю за результатами комп'ютерного моделювання

Дефект ізоляції був прийнятий як еквіпотенціальна поверхня, так як всередині дефекту виникають часткові розряди, фактично шунтуючі сам дефект. Електростатичне поле моделюється в момент виникнення часткового розряду, так як в цей момент часу найбільш ймовірно виникнення пробою ізоляції за рахунок збільшення напруженості електричного поля в ізоляції і виникнення лавини електронів в області дефекту.

Спочатку проводилося моделювання електростатичного поля в кабелі з дефектом круглої форми в перерізі. Результати моделювання показали, що для виникнення пробивної напруженості електричного поля в області дефекту, необхідно, щоб розмір сферичного дефекту можна було порівняти з товщиною ізоляційного матеріалу. Приклад виникнення пробивної напруженості з дефектом круглого перетину представлений на рис. 3.15 і рис. 3.16.

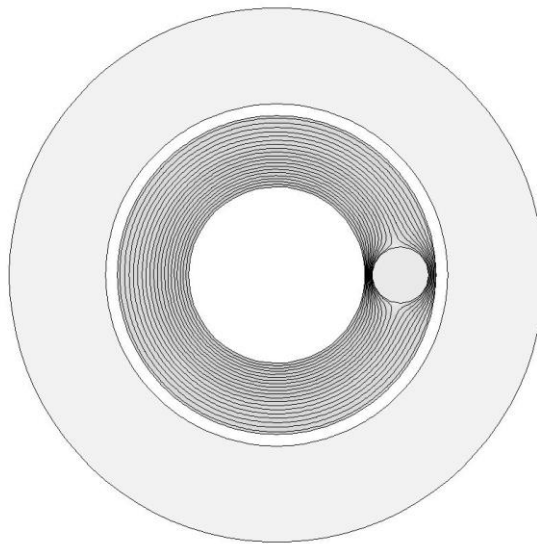


Рисунок 3.15 – Картина розподілу електростатичного поля в кабелі з дефектом круглого перетину

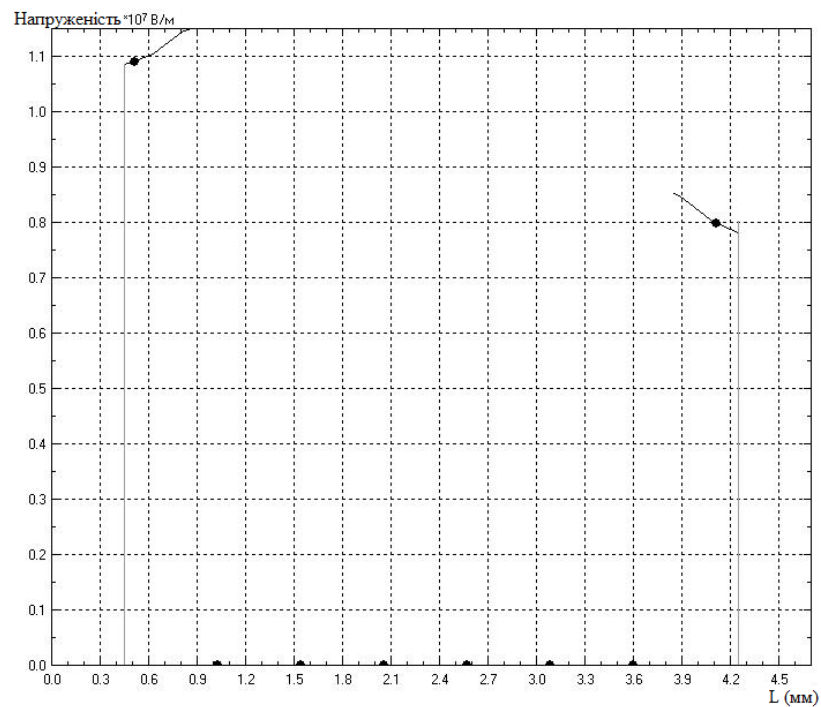


Рисунок 3.16 – Розподіл напруженості електричного поля в кабелі з дефектом круглого перетину

Імовірність виникнення дефекту такого розміру в ізоляції кабелю практично дорівнює нулю, отже, було прийнято рішення провести моделювання електричного поля з декількома дефектами з круглим перетином. Виявлено, що напруженість електричного поля в ізоляції істотно залежить від відстані між дефектами і їх

відстані від струмопровідної жили і екрану. Однак сумарний діаметр всіх дефектів також повинен бути співмірний з товщиною ізоляції для виникнення пробивної напруженості, відповідно така умова також малоймовірно.

Виходячи з отриманих результатів, було вирішено змінити форму дефекту в ізоляції. Найчастіше дефект ізоляції являє собою деревоподібну структуру – дендрит [85], канали якого можуть бути заповнені водою або газом.

При цьому, ймовірність виникнення дендрита найбільш велика поблизу струмопровідної жили, так як в цій області найбільш висока напруженість електричного поля і температура, обумовлена термічною дією струму в жилі.

Таким чином, прийнято рішення проводити моделювання з дефектом еліптичного перетину різних розмірів. Важливою умовою, яка визначає величину напруженості електричного поля, є радіальний найбільший розмір каналу дендрита. У зв'язку з цим, при моделюванні електричного поля вирішено змінювати тільки розмір дефекту по радіусу ізоляції кабелю.

Однак важливим є той факт, що при моделюванні дефекту, проростає від струмопровідної жили до екрану можна задавати його як еквіпотенціальною поверхнею, що стосується жили, так як в цьому випадку моделювання буде некоректним. У зв'язку з цим, вирішено прийняти потенціал на поверхні дефекту рівним потенціалу жили, так як при частковому розряді різницю потенціалів на поверхні дефекту буде зведена до нуля. Після проведення моделювання була отримана картина електростатичного поля в ізоляції з дефектом (рис. 3.17 і рис. 3.18), здатним викликати пробій ізоляції. Товщина еліптичного перетину дефекту прийнята 50 мкм.

Встановлено, що для виникнення пробивної напруженості розмір дефекту по радіусу повинен становити не менше 3 мм при товщині ізоляції 3,8 мм і перетині струмопровідної жили в 70 мм².

При зазначеному розмірі дефекту напруженість електричного поля в ізоляційному проміжку між вістрям дефекту і екраном кабелю вище пробивної напруженості, прийнятої рівною 6 кВ/мм.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Виходячи з отриманих результатів, критерієм виникнення пробою ізоляції є виникнення дефекту, радіальний вимір якого становить не менше 78,9% від товщини ізоляції. Отримані результати будуть використані для уточнення статистичної моделі старіння ізоляції.

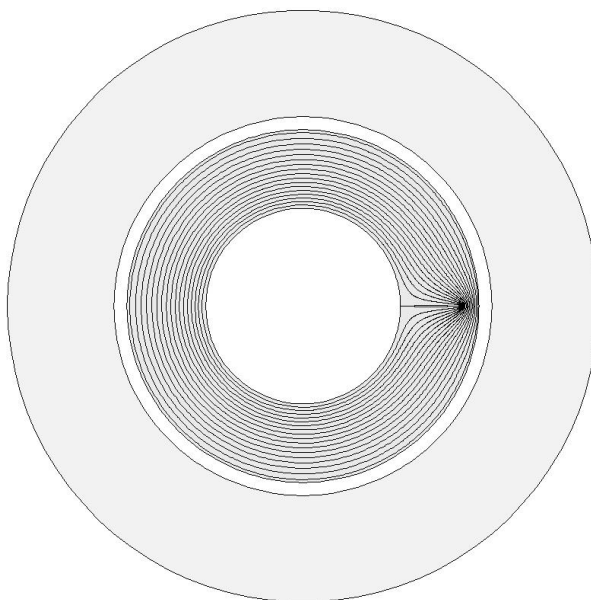


Рисунок 3.17 – Картина розподілу електростатичного поля в кабелі з дефектом

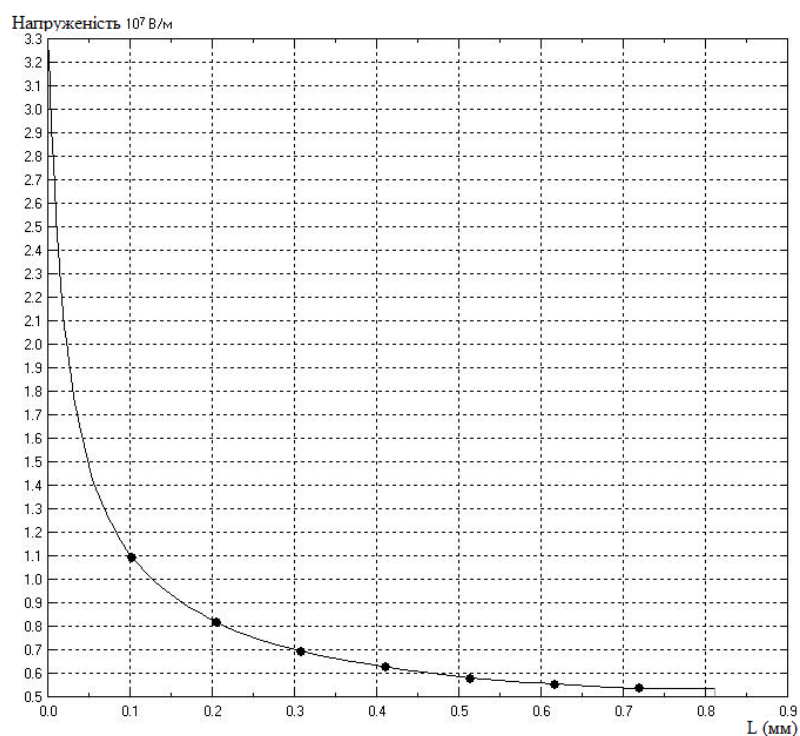


Рисунок 3.18 – Розподіл напруженості електричного поля в ізоляції кабелю в області між вістрям дефекту та екраном кабелю

3.3 Уточнення математичної моделі визначення залишкового ресурсу ізоляції кабелів

В [86] була запропонована математична модель старіння ізоляції, в якій був зроблений розрахунок ймовірності пробою ізоляції в залежності від ступеня руйнування матеріалу. Для розрахунку брався зріз ізоляції розміром 100x100 клітин. При цьому з використанням випадкової функції визначалися координати зруйнованих клітин, і при руйнуванні на одній прямій 10 клітин з 100 вважалося, що стався пробій.

Недоліком моделі [86], є те, що не враховувався третій вимір ізоляції. Для виконання розрахунку в трьох вимірах пропонується використовувати паралелепіпед зі сторонами, пропорційними розмірами ізоляції кабелю по довжині, товщині і внутрішньої довжині кола ізоляції. Використання такої форми дозволить врахувати можливість зростання дендрита не тільки уздовж радіуса.

Для визначення пропорційності сторін необхідно розрахувати розміри кожної з них. Площа перетину струмопровідної жили дорівнює 70 мм² звідси, якщо вважати жилу ідеально круглої, довжина кола дорівнюватиме близько 30 мм. Товщина ізоляції становить 3,8 мм. Для визначення третього розміру необхідно знати можливу кількість включень в обсязі ізоляції кабелю, яке, згідно з [55], становить від 0 до 5 на 200 грам поліетилену.

Однак з огляду на високий рівень розвитку техніки і технологій виготовлення ізоляції з моменту виходу стандарту, приймемо для розрахунку одне включення на 200 грам поліетилену.

Тоді при щільності зшитого поліетилену 940 кг/м³ обсяг ізоляції для розрахунку дорівнює 212766 мм³. Виходячи з обсягу та при відомих двох інших вимірах, третій вимір дорівнюватиме 2086 мм. Таким чином, для розрахунку отримуємо паралелепіпед розмірами 3,4x30x2086 мм.

Для розрахунку необхідно перетворити отриманий паралелепіпед в тривимірний масив елементів для проведення розрахунку. Розміри масивів змінювалися від мінімально можливих (5x44x3067) до максимально можливих,

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обмежених тільки максимальними значеннями змінних (160x1408x98165).
результати моделювання показали, що щільність ймовірності пробою змінюється
за законом розподілу Вейбулла, яке виражається формулою:

$$f = \left(\frac{k}{\lambda}\right) \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (3.14)$$

Однак при збільшенні розмірів масиву параметр розподілу прагнув до
максимально можливого значення, відповідному 79% зруйнованих молекул. Цей
факт пояснюється відсутністю обліку більш високою вірогідністю руйнування
клітини в області, де вже почалося руйнування.

Пропонується прийняти коефіцієнт масштабу $\lambda = 0,63$ (63%), як параметра, що
використовується в розрахунку надійності електроенергетичних систем [87], а
коефіцієнт форми $k = 8$, так як при цьому значенні при руйнуванні 79% матеріалу
ймовірність пробою, функція якої для розподілів Вейбулла виражається формулою
(3.15), прагне до одиниці (рисунок 3.19).

$$F = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k} \quad (3.15)$$

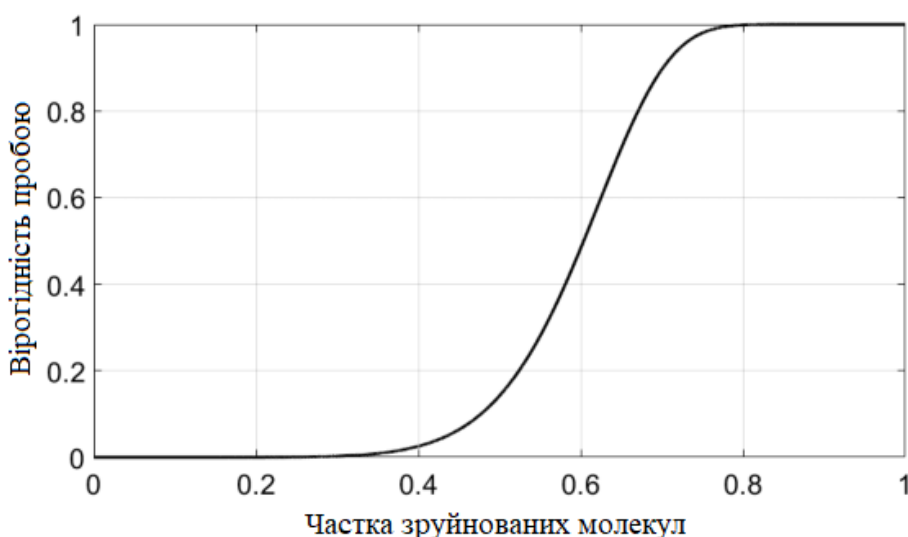


Рисунок 3.19 – Залежність вірогідності пробою від долі руйнування молекул
ізоляційного матеріалу

Отриманий графік залежності ймовірності пробою ізоляції від частки зруйнованих молекул показав, що при руйнуванні матеріалу до 35,5% ймовірність пробою становить менше 1%, після чого починає істотно збільшуватися. Таким чином, при руйнуванні матеріалу до 35,5% велика ймовірність безвідмовної роботи ізоляції. В області від 35,5% до 78% ймовірність пробою істотно зростає, що говорить про можливість частого появи дефектів ізоляції. Відповідно, не рекомендується доводити ступінь руйнування матеріалу до цієї області і робити заміну при руйнуванні порядку 35,5% молекул матеріалу.

Однак руйнування матеріалу до 78% може зайняти значно більше тривалий термін, отже, можливо продовжувати експлуатувати кабель після руйнування 35,5% матеріалу. Але в цьому випадку рекомендується проводити більш ретельний контроль стану ізоляції, наприклад, шляхом моніторингу характеристик часткових розрядів з метою прогнозування пробойів ізоляції.

Пропонується за основу розрахунку залишкового ресурсу взяти модель старіння ізоляції Г. С. Кучинського, згідно з якою термін служби ізоляції можна розрахувати за формулою:

$$\tau_{cl} = AE^{-n} \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right) \quad (3.16)$$

При відомому розрахунковому терміні безвідмовної роботи ізоляції і часу в експлуатації, залишковий термін безвідмовної роботи можна розрахувати по формулі:

$$\tau_{остбр} = \tau_{бр} - \tau_{експл} \quad (3.17)$$

Для розрахунку часу до повного зносу ізоляції потрібно розрахувати час до руйнування 78% матеріалу, отже, розрахунок буде проводитися виходячи з умови $N_t/N_0 = 0,22$:

$$\tau_{cl} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0.22}{b} = \frac{1.514}{-b} \quad (3.18)$$

При відомому розрахунковому терміні служби ізоляції і часу в експлуатації, залишковий ресурс можна розрахувати за формулою:

$$\tau_{зал} = \tau_{cl} - \tau_{експл} \quad (3.19)$$

3.4 Моделювання розрахунку залишкового терміну служби ізоляції кабелів у відомому режимі експлуатації

В даному підрозділі запропонований приклад розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю на основі відомих даних про температуру ізоляції і напрузі кабелю. Дані про температуру і напрузі задавалися випадковим чином з урахуванням добової динаміки зміни споживання електроенергії, проте такого розрахунку досить, щоб показати приклад роботи математичної моделі і спрогнозувати знос ізоляції. Дані, використані для розрахунку, представлені в таблиці 3.1 і на графіках (рис. 3.20 і рис. 3.21).

Таблиця 3.1 – Дані про температуру і напругу кабелю для прогнозування залишкового ресурсу

t, ч	T, °C	U, кВ	t, ч	T, °C	U, кВ	t, ч	T, °C	U, кВ	t, ч	T, °C	U, кВ
1	35	6.05	43	55	6	85	50	5.9	127	20	6.15
2	30	6.1	44	50	6	86	60	5.85	128	20	6.1
3	25	6.1	45	40	6	87	70	5.85	129	20	6.1
4	20	6.15	46	40	6	88	80	5.85	130	30	6
5	20	6.15	47	40	6	89	70	5.85	131	40	5.95
6	20	6.15	48	40	6	90	60	5.9	132	50	5.9
7	20	6.15	49	35	6.05	91	55	6	133	50	5.9
8	20	6.1	50	30	6.1	92	50	6	134	60	5.85
9	20	6.1	51	25	6.1	93	40	6	135	70	5.85
10	30	6	52	20	6.15	94	40	6	136	80	5.85
11	40	5.95	53	20	6.15	95	40	6	137	70	5.85
12	50	5.9	54	20	6.15	96	40	6	138	60	5.9
13	50	5.9	55	20	6.15	97	35	6.05	139	55	6
14	60	5.85	56	20	6.1	98	30	6.1	140	50	6
15	70	5.85	57	20	6.1	99	25	6.1	141	40	6

Продовження табл. 3.1.

t, ч	T, °C	U, кВ	t, ч	T, °C	U, кВ	t, ч	T, °C	U, кВ	t, ч	T, °C	U, кВ
16	80	5.85	58	30	6	100	20	6.15	142	40	6
17	70	5.85	59	40	5.95	101	20	6.15	143	40	6
18	60	5.9	60	50	5.9	102	20	6.15	144	40	6
19	55	6	61	50	5.9	103	20	6.15	145	35	6.05
20	50	6	62	60	5.85	104	20	6.1	146	30	6.1
21	40	6	63	70	5.85	105	20	6.1	147	25	6.1
22	40	6	64	80	5.85	106	30	6	148	20	6.15
23	40	6	65	70	5.85	107	40	5.95	149	20	6.15
24	40	6	66	60	5.9	108	50	5.9	150	20	6.15
25	35	6.05	67	55	6	109	50	5.9	151	20	6.15
26	30	6.1	68	50	6	110	60	5.85	152	20	6.1
27	25	6.1	69	40	6	111	70	5.85	153	20	6.1
28	20	6.15	70	40	6	112	80	5.85	154	30	6
29	20	6.15	71	40	6	113	70	5.85	155	40	5.95
30	20	6.15	72	40	6	114	60	5.9	156	50	5.9
31	20	6.15	73	35	6.05	115	55	6	157	50	5.9
32	20	6.1	74	30	6.1	116	50	6	158	60	5.85
33	20	6.1	75	25	6.1	117	40	6	159	70	5.85
34	30	6	76	20	6.15	118	40	6	160	80	5.85
35	40	5.95	77	20	6.15	119	40	6	161	70	5.85
36	50	5.9	78	20	6.15	120	40	6	162	60	5.9
37	50	5.9	79	20	6.15	121	35	6.05	163	55	6
38	60	5.85	80	20	6.1	122	30	6.1	164	50	6
39	70	5.85	81	20	6.1	123	25	6.1	165	40	6
40	80	5.85	82	30	6	124	20	6.15	166	40	6
41	70	5.85	83	40	5.95	125	20	6.15	167	40	6
42	60	5.9	84	50	5.9	126	20	6.15	168	40	6

Для розрахунку залишкового терміну служби потрібно знати всі параметри моделі старіння ізоляції для визначення швидкості руйнування матеріалу.

Константу швидкості реакції можна визначити за графіком Арреніуса для процесу термодеструкції поліетилену.

Час безвідмовної роботи ізоляції:

$$\tau_{бр} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0.645}{b} = \frac{0.4385}{-b} \quad (3.20)$$

Розрахуємо час безвідмовної роботи ізоляції:

$$\tau_{бр} = \frac{0.4385}{0.000001285} = 341245 \text{ год} \approx 39 \text{ років}$$

Термін безвідмовної роботи:

$$\tau_{залбр} = \tau_{бр} - \tau_{експл} = 341245 - 168 = 341077 \text{ год} \approx 38.9 \text{ років}$$

Період служби ізоляції до її остаточного зносу:

$$\tau_{сл} = \frac{1.514}{0.000001285} = 1178308 \text{ год} \approx 134.5 \text{ років}$$

Залишковий ресурс:

$$\tau_{зал} = \tau_{сл} - \tau_{експл} = 1178308 - 168 = 1178140 \text{ год} \approx 134.49 \text{ років}$$

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Аналіз конструкції кабелю показав, що для розрахунку залишкового ресурсу ізоляції досить враховувати впливу температури і електричного поля на ізоляцію.
2. Розглянуто відомі моделі старіння ізоляції. За основу розрахунку прийнята модель Кучинського Г. С., так як вона ґрунтується на енергетичних впливах на ізоляцію.
3. Удосконалено математичну модель розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю, використання якої дозволить спрогнозувати знос ізоляції.
4. Розглянутий приклад розрахунку залишкового ресурсу ізоляції кабелю говорить про можливість використання математичної моделі в пристрої моніторингу залишкового ресурсу ізоляції.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). - Київ, Міненерговугілля України, 2017.
2. Михель, А.А. Обзор методов диагностики кабельных линий напряжений 6 и 10 кВ / А.А. Михель, А.В. Авдонин, Д.М. Левин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2009. - № 2. - С. 31–39.
3. Пономарев Н.В. Анализ методов диагностики состояния силовых высоковольтных кабельных линий / Н.В. Пономарев// Вестник КузГТУ. - 2012. - № 5(93). - С. 68–71.
4. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. - Л.: «Энергия». Ленингр. Отд-ние., 1979. - 224 с.
5. Койков, С.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков. / С.Н. Койков, А.Н. Цикин М. - Л.: Энергия, 1968. -186 с.
6. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико. - Новосибирск: Наука, 2007. - 155 с.
7. Пат. 2215296 Российская Федерация МПК G01R 27/26 (1995.01). Устройство для определения тангенса угла диэлектрических потерь. / Михеев Г. М. – № 2002100545/09; заявл. 03.01.2002; опубл. 27.07.2003, бюл. №21. – 2 с.
8. Пат. 2115131 Российская Федерация МПК G01R 27/26 (1995.01). Устройство для определения тангенса угла диэлектрических потерь. / Михеев Г. М.; – № 94032785/09; заявл. 08.09.1994; опубл. 10.07.1998. – 2 с.
9. Степанов, В.М. Определение электрического сопротивления изоляции и емкости кабелей / В.М. Степанов, С.В. Ершов // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2010. - № 3–5. - С. 62–64.
10. Соломенцев, К.Ю. Измеритель тока для исследования токов абсорбции в диэлектриках / К.Ю. Соломенцев и др. // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: материалы 13-ой Международной научно-практической конференции. - 2015. - С. 97–99.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

11. Власов, А.Б. Факторный анализ диагностической модели тепловизионного контроля электрической машины / А.Б. Власов, Е.А. Мухин, Б.Д. Царев // Вестник МГТУ. - 2013. - № 1. - С. 46–51.

12. Уразов, Д.Ю. О преимуществах тепловизионного метода анализа работы электрооборудования / Д.Ю. Уразов // Вестник ВГУИТ. - 2012. - №3. - С. 51– 53.

13. Сотников, В.В. Математическое моделирование системы локализации и типизации повреждений работающей силовой сети / В.В. Сотников // Вестник СГТУ. - 2011. - № 4(62). - С. 165–169.

14. Гудков, В.В. Особенности методик и средств испытаний кабелей с СПЭизоляцией / В.В. Гудков // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2009. - № 6. - С. 9–11.

15. Коробейников, С.М. Физика возникновения, характеристики и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании / С.М. Коробейников, М.В. Вечёркин // ЭС и К. - 2010. - № 1. - С. 204–212.

16. Сиялов, Н.В. Совершенствование метода регистрации частичных разрядов / Н.В. Сиялов, Н.А. Фоменко, С.А. Словесный // Труды VI международной молодежной научно-технической конференции «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ». - 2015. - Т. 1. - С. 576–581.

17. Моногаров, О.И. Выбор датчика частичных разрядов для диагностики кабельной изоляции / О.И. Моногаров // Наука и современность. - 2016. - №46. - С. 86–90.

18. Shafiq, M. Effect of geometrical parameters on high frequency performance of Rogowski coil for partial discharge measurements / M. Shafiq и др.// Meas. J. Int. Meas. Confed. - 2014. - Т. 49. - № 1. - С. 126–137.

19. Куценко, С.М. Характеристики частичных разрядов в изоляторах из фарфора и поликарбоната / С.М. Куценко, Н.Н. Климов, В.И. Муратов // Известия ТПУ. - 2006. - № 2. - С. 82–87.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

20. Ashraf, S.A. Study of propagation behaviour of Partial Discharge acoustic signals in a 3-D model tank / S.A. Ashraf и др. // Proc. 2009 44th Int. Univ. Power Eng. Conf. - 2009. - № 1. - С. 3–7.

21. Veloso, G.F.C. Identification of wavefronts in Partial Discharge acoustic signals using discrete wavelet transform / G.F.C. Veloso и др. // 2008 IEEE Int. Symp. Ind. Electron. - 2008. - № 1. - С. 1003–1008.

22. Kundu, P. Wavelet based Fractal Analyzing Method of Partial Discharge Acoustic Emission Signal / P. Kundu, P.N.K. Kishore, P.A.K. Sinha // Processing. - 2007. - August. С. 8–11.

23. He, X. Online partial discharge detection and location system using Wireless Sensor Network / X. He, G. Xie, Y. Jiang // Energy Procedia. - 2011. - Т.12. - С. 420–428. 24. Danouj, B. Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection / B. Danouj, S. Tahan, E. David // Measurement. - 2013. - Т.46. - №1. - С. 660–666.

25. McDermid, W. Response of capacitive couplers on a generating unit to various sources of partial discharge / W. McDermid, J.C. Bromley, T. Black // Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. - 2006. - С. 73–76.

26. Tian, Y. Partial discharge detection in cables using VHF capacitive couplers / Y. Tian и др. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2003. - Т.10. - №2. - С. 343–353.

27. Mota, H.D.O. Partial discharge signal denoising with spatially adaptive wavelet thresholding and support vector machines / H.D.O. Mota и др. // Electr. Power Syst. Res. - 2011. - Т. 81. - № 2. - С. 644–659.

28. Su, M.-S. Phase determination of partial discharge source in three-phasetransmission lines using discrete wavelet transform and probabilistic neural networks / M.-S. Su, J.-F. Chen, Y.-H. Lin // Int. J. Electr. Power Energy Syst. - 2013. - Т. 51. - С. 27–34.

29. Wei, Z. Partial Discharge Signal Obtain Based on Adaptive Wavelet with Mathematical Morphology / Z. Wei и др. // Phys. Procedia. - 2012. - Т.24, - 2011. - С. 912–917.

					02.15.EC1926.ПД.2020-ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

30. Carvalho, A.T. Identification of partial discharges immersed in noise in large hydro-generators based on improved wavelet selection methods / A.T. Carvalho и др. // Meas. J. Int. Meas. Confed. Elsevier Ltd. - 2015. - T. 75. - C. 122–133.

31. Chen, H.-C. A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method for high-voltage power apparatus / H.-C. Chen, F.-C. Gu, M.H. Wang // Expert Syst. Appl. - 2012. - T.39. - № 3. - C. 3423–3431.

32. Venkatesh, S. Orthogonal least square center selection technique - A robust scheme for multiple source Partial Discharge pattern recognition using Radial Basis Probabilistic Neural Network / S. Venkatesh, S. Gopal // Expert Syst. Appl. - 2011. - T. 38. - № 7. - C. 8978–8989.

33. Perpiñán, O. Signal analysis and feature generation for pattern identification of partial discharges in high-voltage equipment / O. Perpiñán и др. // Electr. Power Syst. Res. - 2013. - T. 95. - C. 56–65.

34. Gu, F.C. Partial discharge pattern recognition of power cable joints using extension method with fractal feature enhancement / F.C. Gu и др. // Expert Syst. Appl. - 2012. - T. 39 - № 3. - C. 2804–2812.

35. Chen, H.C. Pattern recognition with cerebellar model articulation controller and fractal features on partial discharges / H.C. Chen, F.C. Gu // Expert Syst. Appl. - 2012. - T. 39. - № 7. - C. 6575–6584.

36. Nafar, M. Using correlation coefficients for locating partial discharge in power transformer / M. Nafar, T. Niknam, A. Gheisari // Int. J. Electr. Power Energy Syst. - 2011. - T. 33. - № 3. - C. 493–499.

37. Ji T.Y. Partial discharge location using a hybrid transformer winding model with morphology-based noise removal / T.Y. Ji, W.H. Tang, Q.H. Wu // Electr. Power Syst. Res. - 2013. - T. 101. - C. 9–16.

38. Ardila-Rey, J.A. Partial discharge and noise separation by means of spectral power clustering techniques / J.A. Ardila-Rey и др. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2013. - T. 20. - № 4. - C. 1436–1443.

					02.15.EC1926.ПД.2020-ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

39. Deshpande, A.S. Partial discharge analysis using energy patterns / A.S. Deshpande, H.A. Mangalvedekar, A.N. Cheeran // Int. J. Electr. Power Energy Syst. - 2013. - Т. 53. - С. 184–195.

40. Kundu P. Identification of two simultaneous partial discharge sources in an oilpressboard insulation system using acoustic emission techniques / P. Kundu, N.K. Kishore, A.K. Sinha // Appl. Acoust. - 2012. - Т. 73. - № 4. - С. 395–401.

41. Biswas, S. An approach based on rough set theory for identification of single and multiple partial discharge source / S. Biswas и др. // Int. J. Electr. Power Energy Syst. - 2013. - Т. 46. - С. 163–174.

42. Ouatah, E. Characteristics of partial discharge pulses propagation in shielded power cable / E. Ouatah и др. // Electr. Power Syst. Res. Elsevier B.V. - 2013. - Т. 99. - С. 38–44.

43. Cselkó, R. Challenges of partial discharge diagnostics of low-voltage cables / R. Cselkó, I. Berta // J. Electrostat. Elsevier Ltd. - 2013. - Т. 71. - № 3. - С. 558–563.

44. Sha, Y. Measurement and simulation of partial discharge in oil-paper insulation under the combined AC-DC voltage / Y. Sha и др. // J. Electrostat. Elsevier Ltd. - 2013. - Т. 71. - № 3. - С. 540–546.

45. Исмагилов, Ф.Р. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика / Ф.Р. Исмагилов, Д.В. Максудов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2011. - Т. 3, - № 43. - С. 98–100.

46. Беспрозванных, А.В. Анализ структуры поля и обоснование напряжений диагностики по частичным разрядам изоляции экранированных витых пар / А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев // ЕіЕ. - 2014. - № 6. - С. 61–65.

47. Борисов, П.А. Водные триинги и принцип определения участков кабельной линии содержащих водные триинги при трассировке кабельных линий П. А. Борисов// Известия ТулГУ. Технические науки. - 2013. - Т. 2. - №12. - С. 176–182.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

48. Кучерявая, И.Н. Компьютерное моделирование частичного разряда вполимерной изоляции с воздушным включением / И.Н. Кучерявая // Праці інституту електродинаміки національної академії наук України. -2013. - № 34.

49. Нагдалян, А.А. Исследование характеристик электроимпульсного разряда в водных растворах хлористого натрия / А.А. Нагдалян и др. // Научный журнал КубГАУ. - 2013. - № 86. - С. 1–10.

50. Najafi Pour, A. A comprehensive circuit model for partial discharge activities in cable insulation due to electrical treeing / A. Najafi Pour, S.M. Shahrtash // Int. J. Electr. Power Energy Syst. Elsevier Ltd. - 2013. - Т. 44. - № 1. - С. 646–655.

51. Резинкина, М.М. Зависимость фазы появления частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции от стадии роста дендрита / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, М.И. Носенко // Журнал технической физики. - 2001. - Т. 71. - № 3. - С. 69–71.

52. Fan, W. Dielectric loss angle data processing based on adaptive weighted data fusion algorithm of the aging mine cable / W. Fan, X. Ma // 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). - 2017. - С. 5739–5742.

53. Лимаренко, Н.А. Исследование диэлектрических свойств электретов на основе эпоксидных полимеров / Н.А. Лимаренко и др. // Вестник Казанского технологического университета. - 2013. - № 2.

54. Yi, H. An novel in-service cable dielectric loss measurement / H. Yi, C. Zhou // 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). - 2017. - С. 119–122.

55. ГОСТ 16336-2013 Композиции полиэтилена для кабельной промышленности. Технические условия. - М.: Стандартинформ. - 31 с.

56. Сороколетов, И.Н. Диагностика кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / И.Н. Сороколетов, П.Н. Бондаренко // Труды СанктПетербургского политехнического университета Петра Великого. - 2012. - № 514. - С. 43–46.

57. Suguna, M. Fault localisation of electrical equipments using thermal imaging technique / M. Suguna, S.M.M. Roomi, I. Sanofer // 2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT). - 2016. - С. 1–3.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

58. Гефле, О.С. Диагностика предпробивного состояния полимерных диэлектриков по тепловым эффектам / О.С. Гефле, Е.И. Черкашина // Известия ТПУ. - 2005. - № 1. - С. 54–59.

59. Da Costa, E.G. Characterization of polymeric insulators using thermal and UV imaging under laboratory conditions / E.G. Da Costa и др. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2009. - Т. 16. - № 4. - С. 985–992.

60. Thomas, G. Synthetic aperture ultrasound imaging of XLPE insulation of underground power cables / G. Thomas и др. // IEEE Electr. Insul. Mag. - 2010. - Т. 26. - № 3. - С. 24–34.

61. Аникушин Д.Г. Анализ методов определения мест повреждения кабельных линий на основе неразрушающей диагностики / Д.Г. Аникушин // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2012. - Т. 3. - № 12. - С. 78–84.

62. Конкин, А.А. Полиолефиновые волокна / А.А. Конкин, М.П. Зверев - 3-е изд. - Л.: Химия, 1966. - 280 с.

63. Тагер, А.А. Физико-химия полимеров / А.А. Тагер; под ред. А.А. Аскадского - М.: Научный мир, 2007. - 576 с.

64. Whitman, L.C. Calculation of life characteristics of insulation / L.C. Whitman, P. Doigan // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics. - 1954. - Т. 73. - № 3. - С. 193–198.

65. Жанчипов, Б.Д. Радиационная электризация диэлектриков / Б.Д. Жанчипов, К.А. Истомин // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле взгляд в будущее научные труды III Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. - Томск: Изд-во ТПУ - 2014. - Т. 1. - С. 83–90.

66. Михеев, Г.М. Эффективность применения кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена взамен токопровода из алюминиевых шин / Г.М. Михеев и др. // Вестник ЧГУ. - 2010. - № 3.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

67. Luo, P. Thermal and mechanical properties analysis for EHV XLPE cables with different operating years / P. Luo и др. // 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. - Т. 3. - С. 47–51.

68. Shimada, A. Degradation distribution in insulation materials of cables by accelerated thermal and radiation ageing / A. Shimada и др. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2013. - Т. 20. - № 6. - С. 2107–2116.

69. Aras, F. Aging of 154 kV underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses / F. Aras и др. // IEEE Electr. Insul. Mag. - 2007. - Т. 23. - № 5. - С. 25–33.

70. Kim, C. Investigation of dielectric behavior of thermally aged XLPE cable in the high-frequency range / C. Kim и др. // Polym. Test. - 2006. - Т. 25. - №4. - С. 553–561.

71. Chen, J. Method of estimating the remaining life of the 10 kV XLPE cable operated 10 years / J. Chen, S. Wang // Proc. 6th Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater. (Cat. No.00CH36347). - 2000. -Т. 1. - С. 204–208.

72. Langlois, V. Thermooxidative aging of crosslinked linear polyethylene: Stabilizer consumption and lifetime prediction / V. Langlois и др. // Polym. Degrad. Stab. - 1993. - Т. 40. - № 3. - С. 399–409.

73. Gulmine, J. V. Correlations between structure and accelerated artificial ageing of XLPE / J. V. Gulmine, L. Akcelrud // Eur. Polym. J. - 2006. - Т.42. - №3. - С. 553–562.

74. Celina, M. Accelerated aging and lifetime prediction: Review of non-Arrhenius behaviour due to two competing processes / M. Celina, K.T. Gillen, R.A. Assink // Polym. Degrad. Stab. - 2005. - Т. 90. - № 3. - С. 395–404.

75. Sugimoto, M. Product analysis for polyethylene degradation by radiation and thermal ageing / M. Sugimoto и др. // Radiat. Phys. Chem. Elsevier. - 2013. - Т.82. - № 1. - С. 69–73.

76. Mazzanti, G. Analysis of the combined effects of load cycling, thermal transients, and electro-thermal stress on life expectancy of high-voltage AC cables / G. Mazzanti // IEEE Trans. Power Deliv. - 2007. - Т. 22. - № 4. - С. 2000–2009.

					02.15.EC1926.ПД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

77. Montanari, G.C. Progress in electrothermal life modeling of electrical insulation during the last decades / G.C. Montanari, G. Mazzanti, L. Simoni // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2002. - Т. 9. - № 5. - С. 730–745.

78. Mazzanti, G. The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage AC cables / G. Mazzanti // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. -2009. - Т. 16. - № 4. - С. 1168–1179.

79. Crine, J.-P. On the interpretation of some electrical aging and relaxation phenomena in solid dielectrics / J.-P. Crine // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2005. - Т. 12. - № 6. - С. 1089–1107.

80. Parpal, J.L. Electrical aging of extruded dielectric cables: A physical model / J.L. Parpal, J.P. Crine, C. Dang // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 1997. - Т. 4. - № 2. - С. 197–209.

81. Zhurkov, S.N. Kinetic concept of the strength of solids / S.N. Zhurkov // Int. J. Fract. - 1984. - Т. 26. - № 4. - С. 295–307.

82. Zhurkov? S.N. Kinetic Concept of Strength of Solids / S.N. Zhurkov // Intern. J. Fract. Mech. - 1965. - Т. 1. - С. 311–323.

83. Закревский, В.А. Электрическое разрушение тонких полимерных пленок / В.А. Закревский, Н.Т. Сударь // Физика твердого тела. - 2005. - Т.47. - №5. - С. 931–936.

84. СТО 56947007- 29.060.20.020-2009 Методические указания по применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ и выше. - СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ ОАО «ФСК ЕЭС» - 50 с.

85. Chen, X. Nonlinear time series analysis of partial discharges in electrical trees of XLPE cable insulation samples / X. Chen, Y. Xu, X. Cao // Dielectr. Electr. Insul. IEEE Trans. - 2014. - Т. 21. - № 4. - С. 1455–1461.

86. Никитин, К. И. Определение срока службы изоляции / К. И. Никитин, Д. А. Поляков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 3. – С. 129-132.

87. Mosch, W. Statistical Techniques for HV Engineering / W. Mosch, W. Hauschild London, UK: Peter Peregrinus. - 1992.

					02.15.ЕС1926.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62