

Кафедра електричних станцій і систем

Бакалаврська дипломна робота на тему:

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ З ПОЛІМЕРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Виконав: студент 4 курсу, групи 2ЕЕ-206
спеціальності 141 – «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
за ОП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Кашевский И.М. Им

Керівник: к.т.н., доцент., доцент каф. ЕСС
Малогулко Ю.В.

« 11 » Februari 2024 p.

Рецензент: к.т.н., доц. Кадр. ЕСБЕМ
(наук. ступінь, вч. звання, назва кафедри)

2024 p.

Допущено до захисту
завідувач кафедри ЕСС
д.т.н., професор Комар В. О.

« 17 » 06 2024 p.

Вінниця ВНТУ 2024 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра електричних станцій та систем
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань – 14 «Електрична інженерія»
Спеціальність – 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Освітньо-професійна програма – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ЕСС

д.т.н., професор Комар В. О.

« 11 » 03 2024 р.

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кашевському Іллі Миколайовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи. «Дослідження особливостей функціонування енергетичного ринку України»

Керівник роботи к.т.н., доц., доцент каф. ЕСС Малогулко Ю.В.

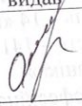
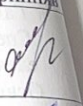
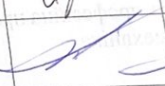
затверджена наказом вищого навчального закладу від 11.03.2024 року № 80.

2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2024 року.

3. Вихідні дані до роботи: Перелік літературних джерел за тематикою роботи. Посилання на періодичні видання.

4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Класифікація та порівняльний аналіз ізоляційних матеріалів кабельних ліній електропередавання напругою 10-110 кВ. 2. Особливості та порівняльний аналіз властивостей ізоляції кабелів. 3. Математична модель теплових процесів у кабельних лініях з ізоляцією із зшитого поліетилену. 4. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Актуальність та задачі дослідження. 2. Конструкція одножильного кабелю з полімерною ізоляцією. 3. Ізоляційні матеріали кабельних ліній електропередавання напругою 10-110 кВ. 4. Порівняння характеристик твердої ізоляції КЛ. 5. Переваги кабелів з ізоляцією із ЗПЕ перед кабелями з ППО. 6. Особливості зшивання поліетилену для головної ізоляції кабельних ліній напругою 10-110 кВ. 7. Тепловий розрахунок кабельної лінії електропередавання. 8. Висновок.

6. Консультанти розділів роботи		Підпис, дата	
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	Керівник роботи Малогулко Ю.В., к.т.н., доц., доцент кафедри ЕСС		
Охорона праці	Кобилянський О. В. д.п.н., проф., завідувач каф. БЖДПБ		

7. Дата видачі завдання 16 січня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва та зміст етапів	Термін виконання етапів роботи		Проміжки
		початок	кінець	
1	Вступ. Огляд літературних джерел	21.01.24	15.02.24	
2	Класифікація та порівняльний аналіз ізоляційних матеріалів кабельних ліній електропередавання напругою 10-110 кВ (розділ 1 БДР)	16.02.24	15.03.24	
3	Особливості та порівняльний аналіз властивостей ізоляції кабелів (розділ 2)	16.03.24	10.04.24	
4	Математична модель теплових процесів у кабельних лініях з ізоляцією із зшитого поліетилену (розділ 3 БДР)	11.04.24	11.05.24	
5	Охорона праці (розділ 4 БДР)	12.04.24	19.05.24	
6	Формування висновків по роботі. Оформлення пояснювальної записки	20.05.24	24.05.24	
7	Виконання ілюстративної частини та оформлення презентації	25.05.24	04.06.24	
	Перевірка БДР на плагіат. Попередній захист БДР	05.06.24	07.06.24	
	Рецензування БДР	08.06.24	10.06.24	
	Захист БДР	За графіком		

Студент

Керівник роботи

(підпис)

(підпис)

І. М. Кашевський

Ю.В. Малогулко

ЗМІ

АНОТАЦІЯ
ANNOTATION
ВСТУП

1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПОРІВН
МАТЕРІАЛІВ КАБЕЛЬНИХ
НАПРУГОЮ 10-110 КВ
2 ОСОБЛИВОСТІ ТА ПОРІВ
ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ

2.1 Фізико-хімічні засади
2.2 Хімічна структура та
2.3 Особливості зш

кабельних ліній напруги
3 МАТЕМАТИЧНА
КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ

3.1 Основи тепл
зшитого поліетилену

3.2 Рівняння

ізоляцією зі зш

3.3 Матема

110 кВ з ізол

3.4 Тепл

4 ОХОРО

4.1 Те

4.1

4

4.1

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ANNOTATION	4
ВСТУП	5
1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАПРУГОЮ 10-110 КВ	8
2 ОСОБЛИВОСТІ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ	15
2.1 Фізико-хімічні засади твердої полімерної ізоляції	15
2.2 Хімічна структура та її вплив на властивості полімерної ізоляції	17
2.3 Особливості зшивання поліетилену для головної ізоляції кабельних ліній напругою 10-110 кВ	21
3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ З ІЗОЛЯЦІЄЮ ІЗ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ	27
3.1 Основи теплового розрахунку кабельних ліній з ізоляцією із зшитого поліетилену 10-110 кВ	27
3.2 Рівняння теплового балансу для кабельних ліній 10-110 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену	30
3.3 Математична модель теплових процесів у кабельних лініях 10-110 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену	34
3.4 Тепловий розрахунок кабельної лінії електропередавання	39
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	50
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання дослідження	50
4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць на КЛ	50
4.1.2 Електробезпека	56
4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	56
4.2.1 Мікроклімат виробничих приміщень	53

4.2.2	Склад повітря робочої зони	53
4.2.3	Виробниче освітлення	57
4.2.4	Виробничий шум	58
4.2.5	Виробничі вібрації	59
4.3	Пожежна безпека	60
	ВИСНОВОК	63
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	65
	ДОДАТКИ	68

АНОТАЦІЯ

Кашевський Ілля Миколайович «Дослідження умов експлуатації кабельних ліній електропередавання з полімерною ізоляцією». Бакалаврська дипломна робота за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Вінниця : ВНТУ. 2024. 68 с.

Українською мовою. Бібліогр.: 26 назв; рис.: 8; табл. 15.

В бакалаврській дипломній роботі прокласифіковано та здійснено порівняльний аналіз ізоляційних матеріалів кабельних ліній електропередавання напругою 10-110 кВ. Досліджено особливості та функціональні властивості ізоляції кабелів. Розглянута математична модель теплових процесів у кабельних лініях з ізоляцією із зшитого поліетилену. В розділі «Охорона праці» виконано технічні рішення щодо безпечного виконання дослідження; технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії; розрахунок виробничого освітлення та шуму і пожежної безпеки.

Ключові слова: кабельна лінія електропередавання, зшитий поліетилен, полімерна ізоляція.

ABSTRACT

Kashevsky Ilya "Investigation of conditions of operation of power transmission cable lines with polymer insulation". Bachelor's thesis on specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering and electromechanics. Vinnytsia: VNTU. 2024. 68 p.

In ukrainian. Bibliography: 26 titles; Fig.: 8; table 15.

In the bachelor thesis, a comparative analysis of insulating materials of cable power transmission lines with a voltage of 10-110 kV was classified and carried out. The peculiarities and functional properties of cable insulation are studied. The mathematical model of thermal processes in cable lines with cross-linked polyethylene insulation is considered. In the "Occupational safety" section, technical decisions regarding the safe execution of the research were made; technical solutions for occupational hygiene and industrial sanitation; calculation of industrial lighting and noise and fire safety.

Key words: cable power transmission line, cross-linked polyethylene, polymer insulation.

ВСТУП

Кабельні мережі 10 - 110 кВ є основою систем енергопостачання промислових підприємств, комунального та побутового електроспоживання, тому наукові, технічні, економічні та організаційні завдання підвищення надійності їх роботи можна вважати важливою науково-технічною проблемою, яка потребує ретельного дослідження та коректного вирішення.

Підвищення надійності кабельних ліній (КЛ) з полімерною ізоляцією багато в чому визначає вдосконалення методів їх проектування, виробництва та експлуатації, реалізація якого дозволить підвищити їхню пропускну здатність, знизити аварійність при впливах на ізоляцію КЛ потужних електромагнітних перешкод, мінімізувати втрати, покращити їх експлуатаційні та характеристики тощо.

При вдосконаленні експлуатаційних властивостей КЛ із полімерною ізоляцією найбільший інтерес становлять проблеми забезпечення захисту ізоляції КЛ від грозових перенапруг при впливах струмів блискавок, що надходять з повітряних ліній (ПЛ), а також внутрішніх, пов'язаних з роботою комутаційних та захисних апаратів. Їх обмеження дозволяє забезпечити необхідний ресурс полімерної ізоляції КЛ і запобігти можливому недовідпуску електроенергії в жорстких умовах резервування в системах електропостачання.

Значні проблеми виникають на етапах проектування та експлуатації КЛ у зв'язку з необхідністю обмеження поздовжніх струмів та напруг у екранах КЛ. Обмеження струмів, що індукуються в екранах з одностороннім розземленням або їх транспозицією, призводить до появи напруг, що перевищують електричну міцність оболонки, і тим самим становлять небезпеку для людей, що знаходяться поблизу КЛ. Тому необхідно уточнення математичних моделей для визначення струмів і напруг, що індукуються в екранах, з метою коректного вибору перерізу екрана, необхідної кількості його секцій або

циклів транспозиції. Поглиблене вивчення процесів пов'язаних із виникненням поздовжніх струмів в екранах, дозволить не допустити введення в експлуатацію КЛ із заниженим перетином екрану, наявність значних втрат у якому призводить до прискореного старіння ізоляції та зниження пропускної здатності КЛ, а у разі не задоволення термічної стійкості до вигорання екрану ходу траси КЛ.

Не менш важливим є вивчення теплових процесів, що проходять в КЛ з полімерною ізоляцією, облік яких при проектуванні дозволяє забезпечити необхідну пропускну здатність при мінімальному перерізі жили КЛ.

Вся проводка і кабелі виробляються з багатьох різноманітних модифікацій, а характеристики і вимога до них мають постійний безперервний ріст. Високоякісний ізолятор вважається той який має гарну еластичність і звичайно ж високою електричною міцністю. Такі можливості для кабелю потрібні, щоб виключити ризик при його пошкодженнях, в якому безпосередньо є певна напруга.

На даний момент в якості ізоляції використовуються такі матеріали: полівінілхлорид (ПВХ), зшитий поліетилен (ЗПЕ), гума, фторопласт, просочений папір. Кожен з цих ізоляторів має ті чи інші якості і недоліки. Але варто врахувати, що всі перераховані ізолятори мають діелектричні характеристики.

На сьогоднішній день найпопулярнішим вважається кабель з полівінілхлоридною (ПВХ) ізоляцією. Цей ізоляційний матеріал спрощує своє виготовлення завдяки різним видам пластмас. Такі види ізоляції мають багато переваг: діапазон робочої температури (зберігає свою еластичність навіть при сильних низькотемпературних умовах); висока еластичність (дозволяє зробити монтаж кабелю в будь-якому напрямку); хороша стійкість від вологи, кислот, механічних впливів (відмінні діелектричні властивості). А до недоліків ізоляції можна віднести сильну чутливість до високих температур і при цьому

втрату первинних параметрів кабелю. Дія ультрафіолетових променів сильно прискорюють процес старіння.

Існує дуже багато кабелів з гумовою ізоляцією. В основу виготовлення входить як синтетичний так і природний матеріал походження. Одним з головних переваг є висока гнучкість. Це дозволяє застосовувати проводку в тих випадках, коли необхідно використовувати максимально гнучкий провідник. Недолік кабелю є в тому, що він з часом втрачає свою еластичність і захисні властивості, при цьому піддається під вплив хімічних реакцій. Також низька внутрішня температура провідника, в основному це близько 65 градусів. Ізоляція з поліетилену має високу або низьку щільність, але при цьому відрізняється своєю відмінною стійкістю від впливу хімічної або ж безпосередньо іншого агресивного середовища. Варто врахувати, що вулканізований поліетилен не боїться перепадів температур і застосовується при різних температурних діапазонах. А ось звичайна поліетиленова ізоляція при нагріванні стає нестабільна. В таких випадках не рекомендується застосовувати дану проводку в умовах підвищеної температури.

Фторопластова ізоляція вважається однією з найміцніших і надійних ізоляторів. Але застосування і монтаж такої проводки вимагає особливих зусиль оскільки такий вид ізоляції має низьку гнучкість і еластичність. Виготовляється шляхом намотування стрічок на жили кабелю або проводки, а потім запікається під впливом високої температури. Такий ізолятор має високу стійкість абсолютно до будь-яких впливів зовнішнього середовища. А щоб його пошкодити механічно, треба докласти максимум зусиль. Паперова ізоляція застосовується дуже рідко оскільки на даний момент існує багато інших різноманітних сучасних матеріалів. Такий папір виготовляється з сульфатної целюлози і в основному застосовується у виробництві силових кабелів. Також до складу такого ізолятора включається віск, масло і каніфоль. Після обробки паперовий ізолятор набуває невластиві характеристики. Самим головним мінусом даної ізоляції є нестійкість до будь-яких зовнішніх впливу.

1 КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАПРУГОЮ 10-110 КВ

На сьогоднішній день все ширше впроваджуються інноваційні рішення, що підвищують надійність, безпеку, енергозбереження і енергоефективність електричних мереж і систем електропостачання. Всі перелічені нововведення повною мірою відносяться до КЛ, які займають основне місце в забезпеченні безперебійного електропостачання і при цьому є елементами з найбільшою аварійністю.

В останні роки склалася тенденція заміни традиційної твердої ізоляції КЛ з кабельного паперу просоченого оливою (ППО), поліхлорвінілу (ПХВ), поліетилену (ПЕ) та полівінілхлоридного пластикату (ПВХ) на перспективні види полімерної ізоляції. До них можна віднести зшитий поліетилен (ЗПЕ), етилен-пропіленову гуму (ЕПГ), їх модифікації та ін. В цілому вони успішно використовуються у світовій електроенергетиці та в вітчизняних електричних мережах.

У промислово розвинених країнах Європи та Америки практично 100% ринку силових кабелів займають кабелі з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Перехід від кабелів з ППО до кабелів з ізоляцією зі ЗПЕ, пов'язаний з дедалі більшими вимогами експлуатуючих організацій до технічних параметрів кабелів. У цьому відношенні переваги ЗПЕ очевидні, а найбільш значущі наведені нижче:

- висока пропускна здатність;
- низька вага, менший діаметр та радіус вигину;
- низька пошкоджуваність;
- поліетиленова ізоляція має малі значення щільності, відносної діелектричної проникності та коефіцієнта діелектричних втрат;
- прокладання на складних трасах;

- монтаж без використання спеціального обладнання;
- значне зниження собівартості прокладки [1, 2].

Застосування ЗПЕ у порівнянні з традиційною в полівінілхлоридною ізоляцією дозволяє:

- використовувати жили меншого перерізу при передачі того ж перетоку потужності;
- збільшити тривало допустиму температуру нагріву жил кабелів до 90 °С;
- збільшити тривало допустиму температуру нагріву жил кабелів при короткому замиканні до 250 °С [9].

З метою виявлення найбільш актуальних і нагальних проблем, як на етапі проектування, так і експлуатації і в подальшому виборі об'єкта дослідження був проведений порівняльний аналіз переваг та недоліків традиційних та перспективних видів твердої полімерної ізоляції, конструкцій КЛ та особливостей їх прокладання, монтажу та експлуатації.

Аналіз проводився, перш за все, з боку надійності, критеріями якої є порівняння характеристик, таких як: стаціонарні, імпульсні струми і напруги; зовнішні та внутрішні теплові впливи; різні види випромінювань: світлові, ультрафіолетові, інфрачервоні, рентгенівські та ін.; хімічно агресивні газові, рідинні (у тому числі вода) середовища та ґрунти; вибухонебезпечні середовища; загальне внутрішнє зволоження структур ізоляції; схильність виникнення порожнин і тріщин у твердій полімерній ізоляції; стійкість до механічних деформацій і ударів та ін. Порівняння характеристик представлено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняння характеристик твердої ізоляції КЛ

Характеристики	Види			Коментарі
	ЕПГ ізоляція	ЗПЕ ізоляція	Паперова просочена ізоляція	
Температура жили при роботі в номінальному режимі, °С	до 105	до 90	до 60-85	При використанні однакових перерізів, навантаження струму

				КЛ з ЕПГ ізоляцією вище.
Температура жили при перенавантаженні, °С	105-140	0	90	Найважливіший показник в стаціонарних післяаварійних режимах.
Температура жили при КЗ (до 5 сек), °С	250	250	200	Найважливіший показник в аварійних режимах КЗ.
Мінімальна температура прокладки без попереднього прогріву), °С	-15 (випускаються зразки, призначені для -40)	-15	0	Для ЗПЕ та ЕПГ ізоляції зовнішня оболонка ГІВХ або безгалогенна композиція.
Температурний діапазон експлуатації, °С	-60 – +50	-50 – +50	-50 – +50	Можливо використання в землі та в повітрі при кліматичних умовах ХЛ.
Питомий термічний опір, м ² -К/Вт	0,95 (добре)	0,82 (середнє)	0,75 (задовільно)	Високий термічний опір знижує ризик деформації в ізоляції кабелю.
Стійкість до випромінювання (світло, УФ, ІК, Р, тощо)	Додатково о захисту не потребує	спеціальне покриття та екран	Немає даних	Необхідна для прокладання у відкритих місцях на повітрі та приміщеннях. Під час прокладання в ґрунті відсутнє випромінювання.
Стійкість до масла, %	0,1	0,7	1,5	Для «брудних» умов. Стійкість до набухання та розчинення.
Радіуси вигину неброньованого екранованого кабелю, гнучкість (Д-зовнішній діаметр кабелю)	7-А	15-Д	25-Д	Висока гнучкість кабелю скорочує час установки та спрощує монтаж КЛ.
Рівні прокладки	Без обмежень	Без обмежень	Не більше 15 м	В кабелях з твердою ізоляцією відсутнє обмеження по рівням прокладки
Нерозповсюджене горіння («Кисневий індекс» КІ)	19 (добре)	18 (середнє)	>20,8 (чудово)	Матеріали КІ<21 є горючими матеріалами та можуть горіти.
Тангенс кута діелектричних втрат	7-Ю ¹²	8-Ю ¹²	6-Ю ¹²²	Втрати активної потужності в

(tg5) при температурі 80°C				діелектрику пропорційні tg5.
Водний трінінг (трінінгостійкість)	Хороша стійкість	При використанні ізоляції з ЗПЕ немає необхідності в присадках, що забезпечують стійкість до водного трінігу	Середня стійкість	Деревоподібні тріщини та порожнини довільної форми при наявності води на поверхні ізоляції, а також при наявності включень води через недосконалість технології виготовлення.
Застосування в мережах з ізолюваною нейтраллю – стійкість до руйнування при однофазному замиканню на землю	Хороша	Погана	Хороша	При виникненні замикання можливі значні пошкодження ізоляції ЗПЕ та виникнення короткого замикання.
Застосування в вибухо-небезпечних зонах	Так	Ні (п.7.3.102 ПУЕ)	Так	Кабель з ЕПГ ізоляції можна використовувати в вибухо-небезпечних зонах.
Строк служби	не менше 50 років	не менше 30 років	не менше 30 років	Заявлений строк служби забезпечується при недопусканні висихання ПІ та зволоження ізоляції з ЗПЕ.
Витривалість при деформації та ударах	Так	Ні	Ні	Знижує ризик пошкодження кабелю при транспортуванні та прокладанні

Переваги кабелів з ізоляцією із ЗПЕ перед кабелями з ППО:

- велика пропускна спроможність за рахунок збільшення допустимої температури жили (допустимі струми навантаження залежно від умов прокладання на 15-30% більше, ніж у кабелю з ППО);
- більший струм КЗ, що витримується;
- менша вага, діаметр і радіус вигину, що забезпечує легкість прокладання кабелю, як у кабельних спорудах, так і в землі на трасах будь-якої складності;

- можливість вести монтажні роботи при прокладанні кабелю при температурах до -20°C без попереднього підігріву, завдяки використанню полімерних матеріалів для ізоляції та оболонки;

- низька питома пошкоджуваність, що забезпечує зниження витрат на ремонтно-відновлювальні роботи та зменшення недовідпуску електроенергії.

- відсутність рідких компонентів, що зменшує час прокладання та вартість монтажних робіт;

- велика потужність, що передається (однофазна конструкція має перетин $800 - 1000 \text{ мм}^2$ і більше);

- великі будівельні довжини (до 3 км);

- тривало допустима температура (90°C) в 1,5 рази, допустиме нагрівання в аварійному режимі (130°C) $\sim$ в 1,5 рази, гранично допустима температура при протіканні струму КЗ (250°C) на 25% більше, ніж для відповідних кабелів із ППО [2, 9, 10].

За сумою факторів, кабелі з ізоляцією зі ЗПЕ більш надійні в експлуатації, вимагають менших витрат на монтаж, реконструкцію та утримання кабельних ліній. Це підтверджено майже сорокарічним досвідом експлуатації таких кабелів у більшості промислово розвинених країн. Наприклад, за даними зарубіжних джерел, відсоток електричних пробоїв кабелів з ізоляцією із ВПЕ на два-три порядки менший, ніж у кабелів з ППО [3].

При порівнянні, не малим за значимістю фактором, є забезпечення пожежної безпеки та можливість застосування у вибухонебезпечних зонах. У цьому відношенні найбільшу перевагу має ЕПГ ізоляція, при горінні якої не виділяються продукти піролізу, а отже, відсутній дим та інші газовиділення, у тому числі й отруйні, небезпечні для людей і сучасних засобів обчислювальної техніки, автоматики, управління та зв'язку. Окрім переваги щодо пожежної безпеки ЕПГ ізоляція повністю нейтральна по відношенню до вологи, що виключає водні триінги (ВТ), як один із найбільш згубних дефектів властивих головному конкуренту ЕПГ ізоляції із ВПЕ.

КЛ з ППО, ПЕ і ВПЕ практично не вологостійкі і повинні бути захищені вологонепроникними полімерними оболонками або покриттями у вигляді спеціального металевого шару з алюмополімерної стрічки, щоб захистити головну ізоляцію та запобігти проникненню води.

Відносно обмежень рівня прокладки полімерна ізоляція має переваги по відношенню до ППО, так як для забезпечення роботи останньої необхідно здійснювати вирівнювання траси або застосовувати оливоканіфольний просочувальний склад, що не стікає.

Найважливіший показник ізоляції КЛ - стійкість до теплових тривалих та короточасних впливів. Саме вона визначає найсуттєвіші технологічні, екологічні та інші властивості КЛ і, насамперед, пожежну безпеку. Вона визначає допустимі тривалі та короточасні температури, а також займання та виділення отруйних димів та газів. На відміну від кабелів з ППО або оливонаповненою ізоляцією, ці кабелі мають високі електричні і механічні властивості і тривалий термін служби серед інших типів кабелів серійно.

Окремі види ЕПГ кабелів випускаються з тривало допустимою температурою по жилі 105 °С, що збільшує пропускну спроможність ще на 15-20% порівняно зі ВПЕ. Однак найбільшого поширення набули конструкції з температурою по жилі 90 °С, як і в кабелів із ЗПЕ ізоляцією.

Виходячи з результатів порівняння характеристик різних видів ізоляції, можна зробити висновок про переважання в найближчому майбутньому на ринку кабельної продукції зразків з ізоляцією з ЕПГ, які володіють характеристиками, що перевершують існуючі аналоги, впроваджені в експлуатацію електроенергетики України, таких як ізоляція з кабельного паперу просоченого оливою, поліхлорвінілу, поліетилену та полівінілхлоридного пластикату. Як ізоляційний матеріал ЕПГ поступається ВПЕ, але має ряд переваг у відношенні монтажу, прокладки, розвитку дефектів та зручності експлуатації.

Гумова ізоляція для кабельних ліній не є новою, але її різновид ЕПГ зовсім недавно був впроваджений в експлуатацію і поки не набув такого широкого поширення як ізоляція з ЗПЕ, тому кабельні лінії з поліетиленовою ізоляцією, зважаючи на накопичений досвід і виявлений ряд завдань що вимагають рішення, представляють більший інтерес як об'єкт дослідження.

На етапі проектування при виборі перерізу екрана виникає необхідність мінімізації в них втрат, які, у ряді випадків, можуть перевищувати втрати в жилах. Нагрів екрану, і як наслідок головної ізоляції, призводить до зниження пропускної здатності всієї КЛ через обмеження нагріву ізоляції до 90 °С, що призводить до здорожчання всієї КЛ через занижену пропускну здатність або обраного перерізу більшого значення.

2 ОСОБЛИВОСТІ ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІЗОЛЯЦІЇ КАБЕЛІВ

2.1 Фізико-хімічні засади твердої полімерної ізоляції

Застосування кабелів з ізоляцією зі ЗПЕ напругою 10-110 кВ дозволяє вирішити багато проблем забезпечення надійного електропостачання, оптимізувати, а в деяких випадках навіть змінити традиційні схеми мереж. У США та Канаді частка кабелів з ізоляцією зі ЗПЕ становить 85%, у Німеччині та Данії – 95%, а в Японії, Франції, Фінляндії та Швеції у розподільчих мережах середньої напруги використовується лише кабель із ізоляцією із ЗПЕ [3].

В якості сировини для виробництва нових ізоляційних матеріалів використовують різні варіанти полімерних сполук. Їх одержують з ненасичених вуглеводнів (мономерів), які у свою чергу виробляються з продуктів крекінгу нафти.

Ці речовини належать до класу поліолефінів. В основі виробництва поліолефінів лежить реакція полімеризації відповідного вихідного субстрату (мономера), що відноситься до класу олефінів. За рахунок розкриття подвійного зв'язку, що є в молекулі мономеру, відбувається утворення високо-молекулярного полімерного продукту.

Найбільш відомі представники поліолефінів: поліетилен низької щільності, поліетилен високої щільності, лінійний поліетилен низької щільності, поліпропілен (ПП), сополімери етилену з іншими мономерами, полібутен, поліізобутен-ізобутилен), і т.п. Поліолефіни становлять близько 60% від обсягу вироблених у світі приблизно 150 млн тон полімерів.

До цінних властивостей поліолефінів, що дозволяють використовувати їх як ізоляційні матеріали відносяться:

- простота переробки;
- мала вага;

- високий ступінь кристалічності, що гарантує міцність і відмінні діелектричні властивості, необхідні для створення надійної ізоляції;
- хороша ударна в'язкість та опір надриву;
- гнучкість (навіть за низьких температур);
- стійкість до дії більшості агресивних хімічних речовин;
- відносно низька ціна, порівняно з іншими пластичними масами.

Однак практично всі поліолефіни характеризуються низьким рівнем адгезії - можливістю створення стійкого з'єднання з поверхнею металу або інших матеріалів. Це є перешкодою для використання їх як ізоляції. Але цю проблему вдається вирішити за рахунок покращення адгезійних властивостей шляхом введення полярних груп у молекули вихідної речовини в умовах хімічних виробництв.

Цінним є той факт, що комплекс властивостей поліолефінів, у тому числі такі, як стійкість до ультрафіолету, окислювачів, до розриву, до усадки при нагріванні, змінюється в дуже широких межах залежно від ступеня орієнтаційної витяжки молекул у процесі отримання полімерних матеріалів та виробів. Крім того, вони можуть бути змінені за допомогою широкого діапазону хімічних модифікаторів: термостабілізаторів, пігментів, антистатиків, ковзаючих та антиблокуючих добавок, УФ стабілізаторів, і т.д.

Для розширення комплексу необхідних властивостей, поліолефіни переробляються методом співекструзії з різними полімерами, наприклад бар'єрними - омиленим сополімером етилену з вініловим спиртом (EVOH), поліамідом, поліефірами, адгезивами, що з'єднують шари різних полімерів, отримуючи багат шарові ізоляції.

Серед поліолефінів як електроізоляційних матеріалів та їх компонентів переважно використовуються поліізобутилен, поліпропілен, поліетилен, які відрізняються структурою елементарних ланок - мономерів (ізобутилену, пропілену та етилену, відповідно).

Молекулярна будова мономерів і склад полімерної композиції впливають на її здатність до переробки і на властивості виробу, що отримується.

2.2 Хімічна структура та її вплив на властивості полімерної ізоляції

Основні структурні блоки, з яких виходять поліолефіни - водневі та вуглецеві атоми. Починаючи з середини 60-х років інтерес до поліпропілену стійко зростає в усьому світі. Він обумовлений, з одного боку, сприятливим поєднанням фізичних, хімічних, термічних та електричних властивостей і гарною перероблюваністю полімеру, а з іншого боку - доступною і стабільною сировинною базою, дешевшою, ніж етилен або стирол.

Все це забезпечує поліпропілену міцне і конкурентоспроможне становище на світовому ринку. В даний час до 70% поліпропілену у всьому світі переробляється в ливарні, термоформувальні вироби та волокно. Решта припадає на екструдовані вироби та ізоляцію.

Поліпропіленові компаунди на базі блоксополімеру пропілену з етиленом (з вмістом ланок останнього в макромолекулі від 7% до 15% моль) є перспективними для виробництва кабельних виробів (у тому числі на напругу понад 500 кВ), де потрібні високоефективні полімерні матеріали з робочим діапазоном температур від -60 до $+130$ °С. Блоксополімерні кабельні композиції (марки 02015-302КМ, 02015-301, 02МК тощо) перевершують поліетиленові за верхньою межею температури експлуатації та стійкістю до розтріскування. Вони знаходять застосування при виготовленні ізоляції водо- та нафто-, геофізичних, сейсмічних телеметричних кабелів, а також монтажних проводів різного профілю та призначення.

Поліетилен (ПЕ) знайшов найширше застосування в кабельній промисловості, завдяки своїм унікальним ізоляційним властивостям. ПЕ в порівнянні з іншими полімерними матеріалами можна отримати в чистому (без домішок) вигляді. Його найважливішою позитивною властивістю є те, що він дуже добре піддається екструзії (випресуванню).

Це кардинальним чином змінює принципи його застосування для виготовлення ізоляційних електротехнічних конструкцій і, перш за все, технологій виробництва силових кабелів і проводів. Ці технології докорінно відрізняються від широко поширених способів виготовлення кабелів з іншими видами ізоляції.

Існують три способи отримання ПЕ шляхом полімеризації:

1) поліетилен високого тиску ПЕВТ (низькою щільністю) виходить при тисках до 300 МПа та температурі близько 200 °С;

На практиці енергонасиченість процесу при високому тиску перешкоджає зростанню прямого ланцюга і, утворюється безліч бічних відгалуджень, які значною мірою визначають властивості ПЕВТ. Утворення бічних відгалуджень перешкоджає щільній упаковці основних полімерних ланцюгів, чим і зумовлено отримання ПЕВТ при описаному процесі.

Поліетилен високого тиску - пластичний, злегка матовий, воскоподібний на дотик матеріал щільністю від 917 до 939 кг/м³.

Ізоляція з ПЕВТ має чудову хімічну стійкість, особливо до кислот, лугів і неорганічних розчинників, високі властивості міцності, тому він знаходить широке застосування в якості електричної ізоляції у вітчизняній та зарубіжній кабельній промисловості. Також ПЕВТ не має запаху і смаку, що дозволяє використовувати його як пакувальний матеріал для харчових продуктів;

2) поліетилен низького тиску ПЕНТ (високої щільності) виходить при тисках 0,3-0,6 МПа та температурі близько 50 °С; він знаходить широке застосування як ізоляції і оболонки кабелів.

Ізоляційні конструкції на основі ПЕНТ більш жорсткі, міцні, менш воскоподібні на дотик у порівнянні з ізоляціями з ПЕВТ. Міцність при розтягуванні і стиску вище, ніж у ПЕНТ, а опір удару і роздирання нижче. Через лінійної структури макромолекули ПЕНТ орієнтуються в напрямку течії, тому опір роздирання в поздовжньому напрямку плівок значно нижче, ніж у поперечному напрямку.

Проникність ПЕНТ нижче, ніж у ПЕВТ, приблизно в 5-6 разів, і він є прекрасною перепорою вологи. По хімічній стійкості ПЕНТ також перевершує ПЕВД, особливо по стійкості до олій і жирів. Зі збільшенням щільності розчинність в органічних розчинниках зменшується, як і проникність по відношенню до розчинників. ПЕНТ схильний до розтріскування під впливом середовища, як і ПЕВТ, але цей ефект може бути зменшений з використанням високомолекулярних марок.

3) Поліетилен середнього тиску ПЕСТ виходить при тисках 3-7 МПа та температурі від 160 до 275 °С. Технологія переробки у виробі значно легше інших видів ПЕ і представляє широкі можливості при створенні ізоляційних конструкцій. Деякі властивості ПЕ наведені у таблиці 3.

За електроізоляційними властивостями ПЕНТ і ПЕСТ при ретельному очищенні від слідів каталізаторів та інших домішок не поступаються ПЕВТ.

Таблиця 2.1 – Порівняння властивостей поліетиленів

Найменування	Щільність, т/м ³	Температура плавлення, °С	Вміст кристалічної фази, %	Приблизні межі міцності
ПЕВТ	0,92-0,93	105-110	55-60	7-14
ПЕСТ	0,96-0,97	127-130	до 93	27-33
ПЕНТ	0,94-0,96	120-125	80-90	20-23

Процес теплового старіння ПЕ суттєво знижується при введенні антиокислювачів (антиоксидантів). Процес фотостаріння (від сонячного світла, ультрафіолетового опромінення - УФО), введенням 1,5-2% дрібнодисперсної сажі в ПЕ, призначений для оболонок кабелів [10].

Таким чином, поліетилен в даний час є одним із найбільш застосовуваних ізоляційних матеріалів при виробництві кабелів. Близько 10% поліетилену, що випускається у світі (~5 млн. тон) - низької і високої щільності, а також

лінійних марок - витрачається на виробництво широкого асортименту кабельних компаундів.

Термопластичному поліетилену притаманні серйозні недоліки, головним з яких є повзучість та різке погіршення механічних властивостей при температурах, близьких до температури плавлення, аж до втрати формостійкості. Ці властивості пояснюються лінійною будовою макромолекул поліетилену. До впровадження технології зшивки поліетилену це обмежувало його сферу застосування.

Термін «зшивання» передбачає обробку поліетилену на молекулярному рівні. У процесі зшивки між макромолекулами поліетилену за рахунок хімічної або фізичної дії утворюються поперечні зв'язки. У результаті створюється тривимірна структура, яка і визначає високі електричні і механічні характеристики матеріалу, меншу гігроскопічність, більший діапазон робочих температур.

Основною перевагою кабелів зі зшитою поліетиленовою ізоляцією є саме велика пропускна здатність за рахунок збільшення допустимої температури жили. Допустимі струми навантаження, залежно від умов прокладки, на 15-30% більше, ніж у кабелю з паперово-просоченою ізоляцією. Застосування матеріалів, що зшиваються, дозволяє отримати ізоляцію з поліпшеними експлуатаційними властивостями - допустима температура нагрівання струмопровідних жил (СПЖ) з термопластичною ізоляцією підвищується на 20 °C і становить 90 °C. Крім того, відзначається підвищення температури нагріву СПЖ в аварійному режимі з 80 до 130 °C, а максимально допустима температура при струмах короткого замикання підвищується з 130 до 250 °C.

Різні методи зшивання поліетилену спочатку розроблялися з метою підвищення робочої температури полімерних виробів. Однак, процеси зшивання дозволяють поліпшити й інші характеристики полімерів, такі як:

- зменшення деформації під навантаженням дає покращені характеристики на розрив/злам при механічному напруженні в ізоляції;

- збільшення хімічної стійкості (в т.ч. до дії розчинників);
- збільшений абразивний опір у кабельних оболонках та трубах;
- ефект пам'яті для усадкових трубних обв'язок, плівок та пакувальних плівок;
- покращені характеристики динамічного навантаження для пресованих виробів та спіненого матеріалу;
- підвищена стійкість до старіння;
- підвищений модуль пружності;
- підвищена удароміцність при низьких температурах;
- знижене краплеутворення (при горінні).

2.3 Особливості зшивання поліетилену для головної ізоляції кабельних ліній напругою 10-110 кВ

При виробництві застосовується три основних промислових способи зшивання поліетилену, в залежності від яких зшитий поліетилен індексується відповідною літерою. Це пероксидний, силановий та радіаційний процеси зшивання. У європейських стандартах прийнято позначення, відповідно: РЕХ-А, РЕХ-В, РЕХ-С.

Всі три технології зшивають окремі молекули поліетилену один з одним у різних місцях так, що виходить мережа. Відповідно вводиться поняття ступінь або щільність зшивки (частка гелю) у відсотках, що відображає частку зв'язків між молекулами поліетилену. Рекомендоване значення – 65-80%.

Технологія пероксидної зшивки (метод А)

Метод А є хімічним способом модифікації («зшивання») поліетилену за допомогою органічних пероксидів або гідропероксидів. Органічні пероксиди являють собою похідні перекису водню (НО-ОН), в яких один (гідропероксид, ROOH) або два (пероксид, ROOR) атома водню заміщені органічними радикалами. Пероксиди належать до особливо небезпечних речовин. Їх отримання - технологічно складний і дорогий процес. Кількість пероксиду, що

додається в розплав, малий і становить близько 0,5 - 2 кг на 1 т поліетилену. Цей процес відбувається в сухому середовищі, а саме в середовищі інертного газу (азоту), при дії високих температур від 300 до 400 ° С і тиску 8-12 атм. При цьому зберігаються електричні характеристики високовольтних кабелів.

Хімізм процесу:

а) реакція починається з розкладання перекису під впливом температури з утворенням радикалів - фрагментів молекул, що мають вільний зв'язок;

б) радикали пероксидів відривають у ланок поліетилену по одному атому водню, що призводить до появи вільного зв'язку у атома вуглецю;

в) у сусідніх макромолекулах атоми вуглецю поєднуються, відбувається рекомбінація макрорадикалів з утворенням просторової структури, сполученої вуглець-вуглецевим зв'язком.

Кількість міжмолекулярних зв'язків становить 2 - 3 на 1000 атомів вуглецю. Утворюється тривимірна сітка, яка унеможливорює утворення кристалітів при охолодженні полімеру (рис. 2.1). Процес вимагає жорсткого контролю за температурним режимом у процесі екструзії, коли відбувається попередня зшивка, і в ході подальшого нагрівання виробу для завершення утворення зв'язків. При охолодженні отриманого продукту спостерігається зниження щільності поліетилену. Розкладання пероксидів відбувається після екструзії за допомогою протяжних ліній безперервної вулканізації, соляної лазні або азотної системи. Пероксидно-зшиті вироби вимагають тривалого уповільненого циклу термообробки (часто при підвищеному тиску) для завершення процесу вулканізації.

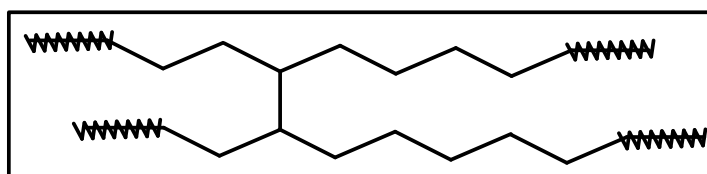


Рисунок 2.1 - Структура поліетилену, зшитого за пероксидною або радіаційною технологією

Метод А – найдорожчий. Він гарантує повне об'ємне охоплення маси матеріалу впливом пероксидів, так як вони додаються у вихідний розплав. Однак, цей метод вимагає, щоб ступінь зшивки РЕХ не був нижчим 75%, що робить вироби з цього матеріалу жорсткішими порівняно з виробами, отриманими способами В і С. Пероксидна технологія застосовується для виробництва кабелів з ізоляцією розрахованої на напругу 10 + 35 кВ, а також для труб.

Технологія силанової зшивки (метод В)

Застосування силанів дозволяє отримати більш гнучкий і економічний процес зшивання. Технологія вологої вулканізації Silquest застосовується у промисловості понад 30 років. Силановиті поліолефіни пов'язані Si-O-Si містками, на відміну від С-З зв'язків, що утворюються в результаті пероксидного або радіаційного методу.

Силанова технологія складається із двох етапів.

1 етап. За рахунок ініціатора йде відрив атома водню і утворюється макро-радикал (аналогічно стадіям а і б пероксидної зшивки); потім утворюється щеплений кополімер за рахунок впровадження силану в полімер, або прищепленням вінілсилану на полімерний ланцюжок, або кополімеризацією вінілсилану з етиленом в реакторі полімеризації.

2 етап. Зшивання у присутності води, зазвичай прискорювана олов'яним або іншими відповідними каталізаторами, що протікає в 2 стадії гідролізу при взаємодії з водою H₂O, а потім йде конденсації з виділенням молекул води. При цьому утворюється тривимірна структура, сполучена не вуглець-вуглецевим зв'язком, як у перших двох випадках, а Si-O-Si містками.

Силанова технологія зшивання має наступні переваги, порівняно з пероксидним і радіаційним методами:

- зниження капітальних вкладень;
- зниження експлуатаційних витрат (вартості енергії);
- підвищення продуктивності;

- широкий спектр рецептур та застосувань;
- можливість виробництва виробів різної товщини;
- можливість виробництва виробів складних форм;
- підвищення відсотка наповнення пластиків;
- можливість застосування з усіма типами поліетиленів та кополімерів.

Поліолефіни, зшиті силаном, з'єднуються за допомогою зв'язку Si-O-Si, а не зв'язку C-C, який має місце в процесах із застосуванням перекису або при радіаційному зшиванні. При використанні технології на основі силану, принаймні деякі зв'язки утворюються, коли одержувана форма знаходиться нижче точки кристалічного плавлення базового поліетилену. У зв'язку з цим, виходить чудовий, більш термостійкий, продукт. Хоча це припущення і не було повністю підтверджено, все ж ПЕ зшитий силаном, є або аналогічний, або, іноді, перевершує ПЕ на основі перекису. Більше того, оскільки обробка проводиться не під високим тиском, технологія дозволяє виробляти складніші за конфігурацією обсяги з несиметричними осями (включаючи складні кабельні конструкції, такі як секторні кабелі), де гостро стояла проблема деформації.

Силанольне зшивання технологічно є найпростішим, оскільки практично не потрібно додаткового технологічного обладнання (все йде на технологічному устаткуванні з переробки термопластичного ПЕ). Однак, цей спосіб зшивання поліетилену неможливо застосувати для кабелів з ізоляцією розраховану на напругу 10-35 кВ, оскільки в процесі обробки досить складно домогтися рівномірності фізико-механічних властивостей у радіальному напрямку ізоляції, а також через те, що ізоляція кабелів високої напруги має значно більшу товщину, порівняно з ізоляцією кабелів низької напруги. Крім того, в процесі режиму зшивки та в кінці його виділяється молекулярна волога H_2O , що може знизити властивості ЗПЕ. Тому процес силанольної зшивки застосовується для силових кабелів із робочою напругою до 1 кВ включно.

Технологія радіаційного зшивання (метод С)

Радіаційна зшивка відноситься до методів фізичної модифікації властивостей полімерів. При опроміненні полімерів електронами, бета- або гамма-променями утворюються вільні радикали, що призводить до появи структур, схожих на отримані в результаті пероксидної зшивки. Вироби опромінюються після процесу екструзії, для цього часто доводиться використовувати окремі виробництва. Процес досить дорогий і тривалий. Іншим недоліком даного методу можна вважати неминучу нерівномірність зшивки по товщині поліетиленового шару.

Тому радіаційна зшивка застосовується тільки для тонкостінних конструкцій: проводів і кабелів низької напруги з товщиною ізоляції 1,0-1,5 мм. Для більших товщин відбувається зшивка поверхневих шарів, а глибші - не зшиваються. Якщо збільшити потужність електронного випромінювання, тоді глибші шари будуть піддаватися зшиванню, а поверхневі - деструкції. Тому радіаційної обробки піддаються поверхневі шари без наведеної радіації і «на прохід» з великою швидкістю.

Радіаційна зшивка поліетилену застосовується при виробництві плівок, термозбіжних труб і кабельної ізоляції. Таким чином, зшитий поліетилен, незалежно від способу зшивання, структурою принципово відрізняється від звичайного поліетилену. У звичайному поліетилені хімічні зв'язки між макромолекулами відсутні, є лише досить слабкі сили міжмолекулярної взаємодії (сили Вандер-Ваальса), які приблизно на порядок менші від хімічних сил взаємодії між атомами вуглецю в молекулі. З'являється більш щільне упакування, між молекулами утворюється сітчаста структура в обсязі.

Така структура ЗПЕ збільшує тривалу робочу температуру, полімер стає термореактивним, тобто не плавиться. Робочі властивості ЗПЕ знаходяться на рівні властивостей термопластичного ПЕ, а нагрівостійкість вища.

Допустиме нагрівання жило кабелю в аварійному режимі, що не перевищує 8 годин на добу і не більше 1000 годин за термін служби, не повинно перевищувати 80 ° С для ПЕ і ПВХП і 130 ° С для ізоляції з ВПЕ.

Таблиця 2.2 – Робочі властивості ЗПЕ

Матеріал	Тривала робоча температура, °С	Гранично допустима температура при КЗ, °С
ПЕ	70	150
ЗПЕ	90	250
ПВХП	70	160

Тривала допустима температура жил кабелю з ППО (в'язке просочування) становить: для кабелів 1 і 3 кВ - 80 °С, на 6 кВ - 65 °С, на 10 кВ - 60 °С, на 20 кВ - 55 °С, на 35 кВ – 50 °С. Температура при КЗ становить 200 °С.

З результатів порівняння характеристик різних видів головної ізоляції КЛ, впливає переважання ізоляції з ЕПГ над ізоляцією з кабельного паперу просоченого оливою, поліхлорвінілу, поліетилену та полівінілхлоридного пластикату. За ізоляційними властивостями ЕПГ поступається ВПЕ, але має ряд переваг щодо монтажу, прокладки, розвитку дефектів та зручності експлуатації.

3 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ З ІЗОЛЯЦІЄЮ ІЗ ЗШИТОГО ПОЛІЕТИЛЕНУ

3.1 Основи теплового розрахунку кабельних ліній з ізоляцією із зшитого поліетилену 10-110 кВ

При визначенні конструкції КЛ здійснюється вибір розмірів і матеріалу ізоляційних засобів, для чого проводяться електричні та теплові розрахунки.

За результатами електричного розрахунку відомі величини напруг і напруженостей поля в ізоляції, конструктивні розміри та структура ізоляції за критерієм забезпечення безаварійної тривалої роботи КЛ і арматури. Вихідними даними при цьому є: номінальна напруга мережі, перетин жили, необхідна пропускна здатність КЛ.

Аналіз теплових процесів у КЛ призначений для визначення максимально допустимого струму/навантаження кабелю, значення якого обмежується найбільшою робочою температурою ізоляції із ЗПЕ в нормальному режимі. На максимально допустимий струм прямо впливає спосіб прокладки, умови охолодження (природні і примусово-примусові), тепловий режим навантаження (стаціонарний, перехідний, циклічний та аварійний).

Для кабельних ліній від 35 кВ і вище не передбачена нормативна документація щодо тривало допустимих струмів, їх визначають для кожної конкретної КЛ тепловим розрахунком. На нижчих класах напруги вона передбачена, але для нетипових випадків потребує доповнення та уточнення.

Нижче, як найбільш характерний випадок експлуатації, розроблена імітаційна модель теплових процесів КЛ з ізоляцією із ЗПЕ в стаціонарному режимі при її природному охолодженні. КЛ входять у стаціонарний режим через десять хвилин після увімкнення під навантаження, під час яких триває перехідний режим.

Джерелами тепла при експлуатації КЛ з ізоляцією із ЗПЕ є: втрати в жилі та екрані (при нераціональному заземленні екранів втрати в них, а отже і

нагрів, можуть перевищувати втрати в жилі), також незначний нагрів присутній в основній ізоляції та оболонці КЛ.

Після увімкнення КЛ під навантаження кількість виділеного тепла більше відведеного $Q_{\text{вид}} > Q_{\text{ввл}}$, КЛ розігрівається, але поступово відведення тепла зростає і настає стаціонарний режим $Q_{\text{вид}} = Q_{\text{ввл}}$.

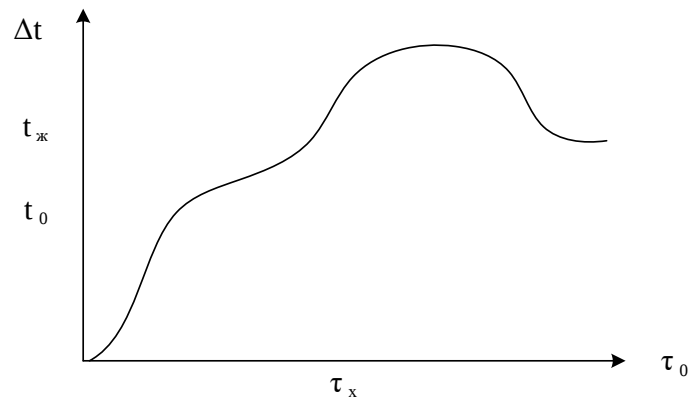


Рисунок 3.1 - Залежність перепаду температур від часу нагрівання

Важливим показником при моделюванні теплових процесів є різниця температур жили і навколишнього середовища:

$$\Delta t = t_{\text{ж}} - t_0 \quad (3.1)$$

де $t_{\text{ж}}$ - температура жили; t_0 - температура навколишнього середовища.

При цьому нагрів КЛ при увімкненні його під навантаження в будь-який момент часу описується експоненціальним законом і має вигляд:

$$\Delta t_x = \Delta t_{\text{max}}(1 - e^{-t/T}), \quad (3.2)$$

де Δt_{max} - максимальний перепад температур; τ - час нагріву; T - постійна часу нагріву кабелю, при якій $\Delta t_x = 0,633\Delta t_{\text{max}}$.

Нагрів КЛ при охолодженні також залежить від часу експоненціально:

$$\Delta t_x = \Delta t_{max} \cdot e^{vT}, \quad (3.3)$$

Описати теплові процеси, що відбуваються в КЛ, можна розділивши джерела тепла, найбільшим з яких є жила:

$$Q_{ж} = - \frac{F \frac{dt}{dr}}{p_t} = - \frac{2\pi r \cdot \lambda \frac{dt}{dr}}{p_t}, \quad (3.4)$$

де p_t - питомий термічний опір електричної ізоляції кабелю; r - поточний радіус від поверхні жили r_1 до поверхні ізоляції r_2 .

Проінтегрувавши вираз (3.4):

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = - \frac{Q_{ж}}{2\pi} \cdot \rho_{t1} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r}, \quad (3.5)$$

У результаті після (2.1.5) виходить залежність перепаду температура при одному джерелі тепла від жили:

$$t_1 - t_2 = \Delta t = \frac{Q_1 \cdot \rho_1}{2\pi} \lambda n \frac{r_2}{r_1}, \quad (3.6)$$

Позначивши $T = \frac{\rho_1}{2\pi} \lambda n \frac{r_2}{r_1}$ як термічний опір ізоляції для будь-якого концентричного шару, вираз (3.6) набуде вигляду:

$$t_1 - t_2 = \Delta t = Q_1 \cdot T_1. \quad (3.7)$$

3.2 Рівняння теплового балансу для кабельних ліній 10-110 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену

Як вище згадувалося в КЛ є кілька джерел тепла, тому для їх поєднання на вплив обмеження довго допустимого струму в жилі застосуємо принцип суперпозиції джерел.

Як початок аналізу теплових процесів і зручності подальшого розрахунку проведено комп'ютерне моделювання теплових процесів при одному джерелі від жили для визначення тривало допустимого струму.

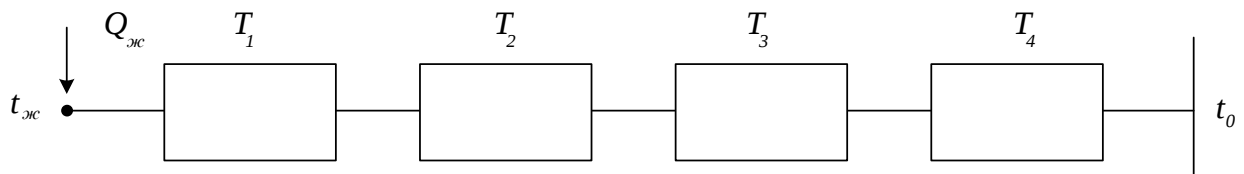


Рисунок 3.1 - Еквівалентна теплова схема заміщення одножильного кабелю, прокладеного у землі. Термічні опори: T_1 - головної ізоляції; T_2 – екрану; T_3 – оболонки; T_4 – переходу від нагрітої поверхні кабелю до навколишнього середовища (землі)

Із записаної еквівалентної теплової схеми заміщення складено рівняння «теплого» закону Ома:

$$t_1 - t_2 = \Delta t = Q_{жс} \cdot T_1 + Q_{жс} \cdot T_2 + Q_{жс} \cdot T_3 + Q_{жс} \cdot T_4, \quad (3.8)$$

де t_1 - максимально допустима температура жили кабелю; t_0 – температура навколишнього середовища; $T = T_1 + T_2 + T_3 + T_4$ - повний тепловий опір кабелю. При прокладанні силових кабелів в траншеї температура ґрунту (на рівні прокладки кабелю) приймається: для літа $t_0 = 15^\circ\text{C}$, для зими $t_0 = 0^\circ\text{C}$. При прокладанні кабелю на повітрі температура навколишнього середовища

середньорічна приймається $t_0 = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо немає спеціальних даних про річну зміну температури прокладки.

Тепловий потік від струмопровідної жили:

$$Q_{жс} = I^2 \cdot R, \quad (3.9)$$

де I - Струм у струмопровідній жилі при максимально допустимій температурі t_1 ; R - електричний опір жили при температурі t_1 . Максимально допустимий струм у жилі:

$$I = \sqrt{\frac{\Delta t}{RT}}. \quad (3.10)$$

Джерелами тепла в КЛ з ізоляцією зі ЗПЕ виступають: струмопровідна жила $Q_{жс}$, електрична головна ізоляція $Q_{гі}$ оболонка Q_o , металевий екран Q_e , напівпровідний екран $Q_{не}$. Втрати в діелектрику, що переходять в Q_d , розподілені по всьому об'ємі ізоляції, тому тепловий потік, який проходить через шари, що розташовані на різній відстані від центру кабелю, будуть різними. Частину теплового потоку Q_d необхідно обчислювати інтегруванням.

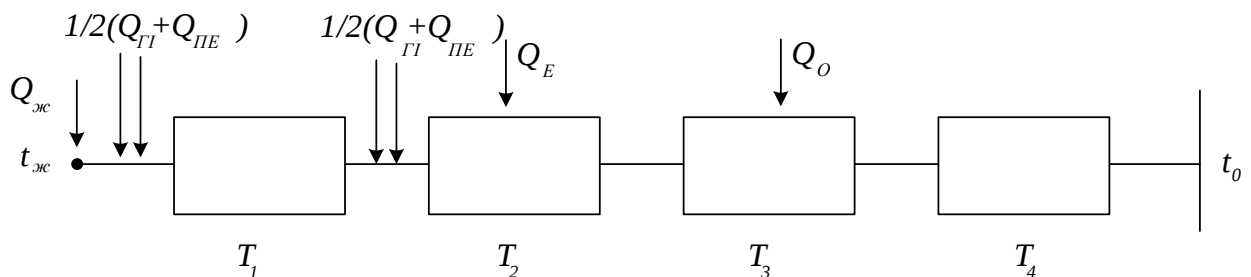


Рисунок 3.2 - Еквівалентна теплова схема заміщення одножильного кабелю, прокладеного у землі, з усіма джерелами тепла

Тепловий потік від жили та екрану визначається виразами: $Q_{жс} = I_{жс}^2 \cdot R$, $Q_E = I_E^2 \cdot R = \alpha_1 Q_{жс}$, тепловий потік від екрану КЛ в умовах експлуатації прорахувати складно, тому надалі в математичній моделі приймається коефіцієнт представляє відношення теплового потоку від жили до теплового потоку від екрану: $\alpha_1 = \frac{Q_E}{Q_{жс}}$, те ж відноситься до теплового потоку від оболонки КЛ, хоч він і є не значним, облік його необхідний з огляду на те, що оболонка статистично найбільш ушкоджуваний елемент КЛ. Тепловий потік від втрат у головній ізоляції визначається виразом: $Q_{ГІ} = CU_\phi^2 \omega \operatorname{tg} \delta$, де C - ємність кабелю на кілометр; U_ϕ – фазна напруга; $\omega = 2\pi f$ де f - частота електричного поля; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс кута діелектричних втрат.

Рівняння складене на підставі "теплового" закону Ома з урахуванням суперпозиції джерел тепла (рис. 3.2):

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 = \Delta t = & Q_{жс} \cdot T_1 + Q_{жс} \cdot T_2 + Q_{жс} \cdot T_3 + Q_{жс} \cdot T_4, + \\ & + \frac{1}{2} Q_{ГІ} \cdot T_1 + \frac{1}{2} Q_{ГІ} \cdot T_2 + \frac{1}{2} Q_{ГІ} \cdot T_3 + \frac{1}{2} Q_{ГІ} \cdot T_4 + \\ & + \alpha_1 Q_{жс} T_3 + \alpha_1 Q_{жс} T_4 + \alpha_2 Q_{жс} T_4. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Рівняння теплового балансу КЛ з ізоляцією із ЗПЕ (3.11) надалі дозволить визначити нагрівання основних ізоляційних елементів КЛ: головної ізоляції та оболонки. Термічний опір головної ізоляції можна обчислити за виразом:

$$T_1 = \frac{\rho_1}{2\pi} \lambda n \frac{r_2}{r_1}, \quad (3.12)$$

де ρ_1 - питомий термічний опір ізоляції; r_1 - радіус по поверхні жили або екрану по жилі; r_2 – радіус по поверхні електричної ізоляції.

Термічний опір переходу від нагрітої поверхні кабелю до землі:

$$T_2 = -\frac{\rho_2}{2\pi} \lambda n \frac{2L}{r_n}, \quad (3.13)$$

де ρ_2 - питомий термічний опір переходу від нагрітої поверхні кабелю до землі; L - глибина прокладки кабелю: від центру кабелю до поверхні землі; r_n – зовнішній радіус кабелю.

При прокладанні кабелю повітря термічний опір розраховується за виразом:

$$T_3 = -\frac{\rho_3}{\pi d_n}, \quad (3.14)$$

де ρ_3 - питомий термічний опір переходу від нагрітої поверхні кабелю до навколишнього повітря; d_n – зовнішній діаметр кабелю.

Значення питомих термічних опорів матеріалів наведено у таблиці 2.1.1.

Таблиця 3.1 - Питомі термічні опори матеріалів, що застосовуються для ізоляції та захисних покриттів

Матеріал	p_t , К·м/Вт
Матеріал ізоляції:	
Поліетилен	3,5
Полівінілхлорид	5,0 – 6,0
Ізоляційна резина	5,0
Резина на основі бутил каучука	5,0
Етиленпропіленова резина	3,5 – 5,0
Матеріали захисних покриттів	
Полівінілхлорид	5,0 – 6,0
Поліетилен	3,5
Поліхлоропрен	5,5
Матеріали кабелі ПГ оводів	
Бетон	1,0
Фібра	4,8
Асбоцемент	2,0
Полівінілхлорид	7,0
Поліетилен	3,5

При прокладанні в траншею кладуть кілька кабелів. Резервні та кабелі з навантаженням до 50 % не впливають на сусідні, але якщо навантаження на кабелі перевищує 50 %, необхідно максимально допустимий струм помножити на поправочні коефіцієнти (табл. 3.2).

Таблиця 3.2 Коефіцієнти навантаження кабелів, прокладених у траншеях

n	1	2	3	4	5	6
$l = 100\text{мм}$	1,0	0,90	0,85	0,80	0,78	0,75
$l = 300\text{мм}$	1,0	0,93	0,9	0,87	0,86	0,85

Примітка: а) n – кількість кабелів у траншеї; б) l - відстань між кабелями у світлі.

У сильно пересічених місцевостях для захисту від механічних пошкоджень кабелі прокладаються в бетонних блоках з осередками 2х2, 2х3 та ін. Для затягування кабелю в блок отвір осередку блоку вибирається трохи більше зовнішнього діаметра кабелю, тому поверхнею кабелю і блоком в отворі осередку залишається тонкий прошарок повітря, який має високий тепловий опір. При цьому сусідні кабелі підігрівають один одного. Через це і погіршене тепловідведення, залежно від розташування комірки з кабелем, навантаження на ньому може знизитися на 20-25%. Для обліку зниження тривало допустимого струму через присутній прошарку повітря в осередку блоку використовуються поправочні коефіцієнти представлені у вигляді довідкових даних.

3.3 Математична модель теплових процесів у кабельних лініях 10-110 кВ з ізоляцією зі зшитого поліетилену

При розрахунку допустимих навантажень у кабелі необхідно враховувати залежність теплофізичних властивостей (теплопровідність і теплоємність) від температури розрахункові залежності яких наведено на рис. 3.3.

Для одножильного кабелю, що складається з круглої жили, ізоляції зі ЗПЕ, металевого екрану та полімерної захисної оболонки, прокладеного у повітрі, рівняння теплового балансу для кожного з наведених елементів складена система, вирішуючи яку знаходиться температура головної ізоляції та

для жили:

$$Q_{II} = CU_{\phi}^2 \omega \operatorname{tg} \delta / I^2 \cdot R_{\text{ж}} + 2\pi \cdot r_0 \cdot \lambda_{iz} \frac{dt}{dr} \Big|_{r=r_0}; \quad (3.15)$$

для ізоляції:

$$\frac{d}{dr} \left(\lambda_{iz} r \frac{dt}{dr} \right) + \frac{U^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \operatorname{tg} \delta}{r (\ln R / r_0)^2} = 0; \quad (3.16)$$

для екрану:

$$I_E^2 \cdot R_E - 2\pi \cdot R \cdot \lambda_{iz} \frac{dt}{dr} \Big|_{r=R} + 2\pi \cdot r_e \cdot \lambda_{ob} \frac{dt}{dr} \Big|_{r=R} = 0; \quad (3.17)$$

для оболонки:

$$\frac{d}{dr} \left(\lambda_{ob} r \frac{dt}{dr} \right) = 0; \quad (3.18)$$

на поверхні кабелю:

$$\lambda_{ob} r \frac{dt}{dr} \Big|_{r=r_{ob}} + \alpha(t_{ob} - t_0) = 0. \quad (3.19)$$

У наведеній математичній моделі використовуються такі позначення: I, I_E - струми в жилі та екрані; $R_{\text{ж}}, R_E$ - електричні опори жили та екрану; r_0, R, r_e, r_{ob} - радіуси по жилі, ізоляції, екрану та оболонці; $\lambda_{iz}, \lambda_{ob}$ - питомі теплопровідності ізоляції та оболонки, що залежать від температури; r, t - радіус і температура в точці кабелю, що розглядається; a - коефіцієнт

тепловіддачі з поверхні кабелю; $t_{об}$, t_0 - температури на оболонці і в навколишньому середовищі.

Для вирішення отриманої системи рівнянь можна використовувалися підстановки Кірхгофа. При цьому вводяться нові функції:

$$V_1 = \int \lambda_{i3} dt, \quad (3.20)$$

$$V_2 = \int \lambda_{o\bar{o}} dt. \quad (3.21)$$

Тоді рівняння (3.15) – (3.19) можна переписати у вигляді:

$$I^2 \cdot R_{\text{жс}} - 2\pi \cdot r_0 \cdot \lambda_{i3} \frac{dV_1}{dr} \Big|_{r=r_0} = 0; \quad (3.22)$$

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dV_1}{dr} \right) + \frac{U^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \text{tg} \delta}{r (\ln \frac{R}{r_0})^2} = 0; \quad (3.23)$$

$$I_E^2 \cdot R_E - 2\pi \cdot R \cdot \frac{dV_1}{dr} \Big|_{r=R} + 2\pi \cdot r_E \cdot \frac{dV_2}{dr} \Big|_{r=r_E} = 0; \quad (3.24)$$

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dV_2}{dr} \right) = 0; \quad (3.25)$$

$$\frac{dV}{dr} \Big|_{r=r_{o\bar{o}}} + \alpha (t_{o\bar{o}} - t_0) = 0. \quad (3.26)$$

Проінтегрувавши (3.23) та (3.25):

$$V_1 = - \frac{U^2}{2 \cdot \left(\ln \frac{R}{r_0} \right)^2} \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \text{tg} \delta \cdot \ln^2 r + C_1 \ln r + C_2, \quad (3.27)$$

$$V_2 = C_3 \ln r + C_4. \quad (3.28)$$

У попередніх виразах C_1 , C_2 , C_3 і C_4 - постійні інтегрування, що визначаються за відомими аналітичними залежностями теплопровідності ізоляції оболонки від температури.

При розрахунку допустимих навантажень у кабелі необхідно враховувати залежність теплофізичних властивостей (теплопровідність і теплоємність) від температури розрахункові залежності яких наведено на рис. 3.3.

На наведених кривих яскраво виражена точка зламу в діапазоні 110-115°C, обумовлена процесом переходу кристалічної фази полімеру в аморфний стан.

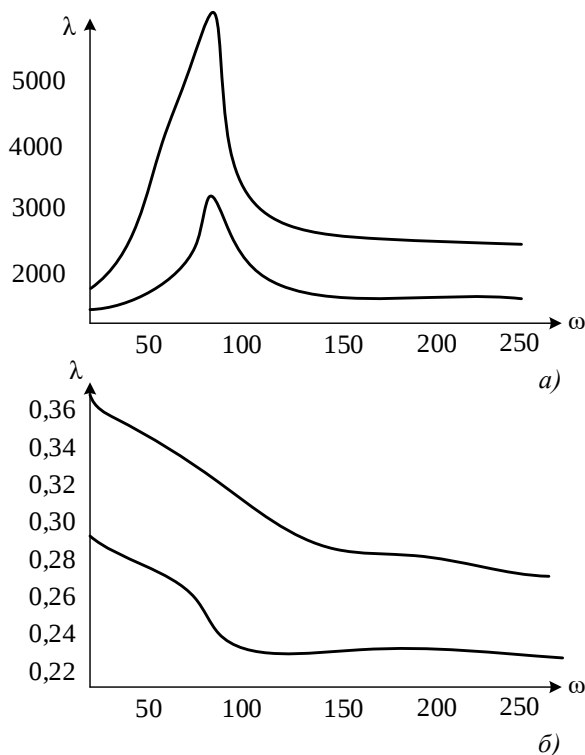


Рисунок 3.3 - Розрахункові залежності теплоємності (а) та теплопровідності (б) полімерних матеріалів від температури: 1) - ЗПЕ; 2) - шланговий ПЕ з вмістом 2,5% сажі; 3) - сополімер етилену з вінілацетатом із вмістом 30% сажі (напівпровідні екрани в кабелі)

Для отримання необхідної точності під час вирішення рівнянь криву 1 на рис. 3.3, отриману для зшитого поліетилену, можна апроксимувати трьома відрізками прямих ліній:

$$\lambda_{iz} = \begin{cases} \lambda_1 - k_1 & \text{для } t \leq 81^\circ \text{C}; \\ \lambda_0 - k_0 & \text{для } 81 \leq 105^\circ \text{C}; \\ \lambda_0 & \text{для } \geq 105^\circ \text{C}. \end{cases} \quad (3.29)$$

У цьому випадку для тривало допустимого режиму кабелю ($t_{жс} = 90^\circ \text{C}$) точка першого зламу прямої лінії ($k_\phi = 81^\circ \text{C}$) повинна розташовуватися в товщі ізоляції. Переписавши вирази з урахуванням (3.29), виходить:

$$I^2 \cdot R_{жс} + 2\pi \cdot C_1 - \frac{P_\phi \lambda n r_0}{\lambda n \left(\frac{R}{r_0} \right)} = 0; \quad (3.30)$$

$$-\frac{P_\phi}{4\pi \lambda n \left(\frac{R}{r_0} \right)} \lambda n^2 r_0 + C_1 \lambda n r_0 + C_2 = \lambda_1 t_\phi - \frac{k_1}{2} t_\phi^2 + \lambda_0 t_{жс} \frac{k_0}{2} t_{жс}^2 - \lambda_0 t_\phi \frac{k_0}{2} t_\phi^2; \quad (3.40)$$

$$C_3 \lambda n r_E + C_4 = \lambda_1 t_E + \frac{k_1}{2} t_E^2; \quad (3.41)$$

$$y_e I^2 R_{жс} + \frac{P_\phi \lambda n R}{\lambda n \left(\frac{R}{r_0} \right)} - 2\pi(C_1 - C_3) = 0; \quad (3.42)$$

$$\alpha \cdot r_{об} (t_{об} - t_0) + C_3 = 0; \quad (3.43)$$

$$C_3 \lambda n r_{об} + C_4 = \lambda_1 t_{об} + \frac{k_1}{2} t_{об}^2. \quad (3.44)$$

Вирішуючи систему рівнянь теплових процесів в елементах КЛ, були отримані аналітичні вирази для визначення:

- температури головної ізоляції КЛ із ЗПЕ:

$$t_{ГЛ}(K) = \begin{cases} \frac{\lambda_0 - \sqrt{\lambda_1^2 - 2k(C_1\lambda nr + C_2 - \frac{P_\delta}{4\pi\lambda n(R/r_0)}\lambda n^2 r)}}{k_1} & \text{для } t \leq 80^\circ C \\ \frac{\lambda_0 - \sqrt{\lambda_0^2 - 2k_0(C_1\lambda nr + C_2 - \frac{P_\delta}{4\pi\lambda n(R/r_0)}\lambda n^2 r + k)}}{k_0} & \text{для } 81 \leq t \leq 105^\circ C \end{cases} \quad (3.45)$$

$$\text{де } k = \lambda_1 t_\phi - \frac{k_1}{2} t_\phi^2 + \lambda_0 t_\phi - \frac{k_0}{2} t_\phi^2.$$

- температури оболонки КЛ:

$$t_{oo}(r) = \left\{ \frac{\lambda_0 - \sqrt{\lambda_1^2 - 2k(C_3\lambda nr + C_4)}}{k_1} \right\}. \quad (3.46)$$

Якщо при розрахунках буде виявлено, що точка першого зламу на кривій залежності теплопровідності від температур $t_\phi = 81^\circ C$ виявиться в товщі оболонки, то необхідно зробити відповідні зміни в системі рівнянь та повторити обчислення постійних інтегрування.

Наведені співвідношення дозволяють розраховувати температуру головної ізоляції та оболонки, враховуючи не тільки нагрівання жили, але й екрану, температура якого, у разі заземлення з обох боків, і малого перетину, може перевищувати температуру в жилі. Уточнений облік втрат в елементах КЛ з ізоляцією із ЗПЕ дозволяє адекватно оцінити її пропускну здатність обмежену нагріванням головної ізоляції до $90^\circ C$ і вжити заходів щодо їх обмеження на етапі проектування.

3.4 Тепловий розрахунок кабельної лінії електропередавання

Прокладка кабельних трас в полімерних трубах – це сучасний високотехнологічний метод побудови електричних мереж, який має переваги перед прокладкою кабелів у відкритому ґрунті або в залізобетонних каналах:

низькі земляні роботи та висока швидкість будівництва [10, 11].

Після ряду спрощень були запропоновані формули, за якими можна оцінити пропускну здатність кабелів з ізоляцією зі зшитою поліетиленовою. Зокрема, показано, що в номінальному режимі роботи при температурі жили кабелю 90°C , що є прийнятним для ізоляції зі зшитого поліетилену, температура оболонки кабелю може досягати $75-85^{\circ}\text{C}$ і тому в конструкції кабелів не можна використовувати труби холодної води від низького тиску. Труби холодного водопостачання для прокладання кабелю, виконані з поліетилену низького тиску (ПНТ), розраховані на температуру не вище 40°C .

Незважаючи на опубліковані результати досліджень, отримані різними способами і різними дослідницькими групами, все ще є практикуючі інженери, які вважають, що при температурі жили кабелю 90°C температура оболонки не буде перевищувати 40°C і використання ПНТ труб виправдане. Але на сьогоднішній день розрахунок теплового розрахунку став настільки доступним, що кожен може на власні очі побачити, наскільки насправді висока температура оболонки біля кабелю, а зручним інструментом для цього є спрощені формули.

Крім високої температури оболонки і неприпустимості використання ПНТ труб, робиться висновок про те, що використання поправочного коефіцієнта 0,9 для прокладки кабелів в трубах в корені неправильний в конструкції.

Кабелі, прокладені в трубах, мають низьку пропускну здатність (допустимий струм в жилі) порівняно з прокладкою на відкритому повітрі, що пов'язано з поганою теплопровідністю повітря, яке заповнює трубу [4, 10]. За деяких умов прокладання кабельної мережі в трубі не зменшує допустимий струм КЛ, а навпаки навіть збільшує його.

На рисунку 3.4 схематично показана конструкція силового однофазного кабелю і один із способів його прокладки – у полімерній трубі, розміщеній у ґрунті. Під час проведення оціночних розрахунків можна вважати, що кабель

розташований в середній частині труби (насправді кабель завжди розташовується на дні труби).

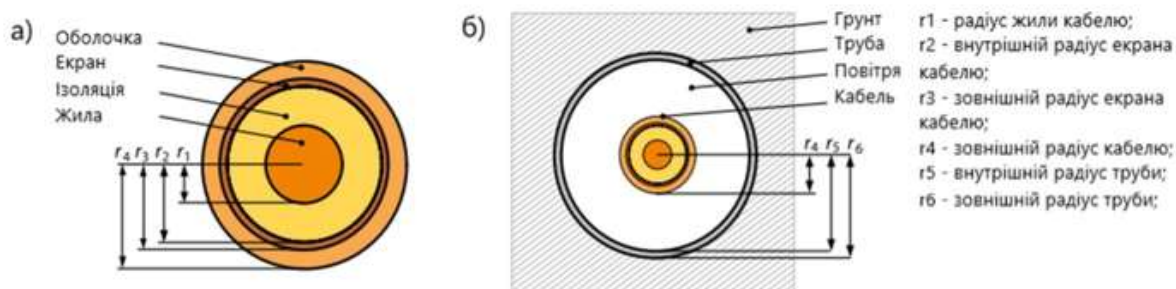


Рисунок 3.4 – Силовий однофазний кабель, прокладений у поліетиленовій трубі в ґрунті; а) конструкція та параметри кабелю; б) спосіб прокладання та параметри труби

Тепловий розрахунок кабелю заснований на вирішенні рівняння теплового балансу: активна потужність, що виділяється в кабелі втрачає, переходить у тепло, яке через ізоляцію (І) кабелю, оболонку (О), повітря (П) у трубі і через саму трубу (Т) йде в навколишній ґрунт (Г), зустрічаючи на своєму шляху теплове опір цих верств: R_I , R_O , R_P , R_T , R_G .

$$\begin{aligned}
 R_I &= \frac{\rho_I}{2\pi} \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right), R_O = \frac{\rho_O}{2\pi} \ln \left(\frac{r_3}{r_4} \right), R_B = \frac{\rho_B}{2\pi} \ln \left(\frac{r_5}{r_4} \right), \\
 R_T &= \frac{\rho_T}{2\pi} \ln \left(\frac{r_6}{r_5} \right), R_G = \frac{\rho_G}{2\pi} \ln \left(\frac{2h}{r_6} \right),
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

де ρ_I , ρ_O , ρ_B , ρ_T , ρ_G – відповідні питомі теплові опори, $\text{К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$;

h – глибина прокладання кабелю, м.

При розгляді цього рівняння та його складових вважаємо, що тепло відводиться від кабелю тільки в радіальному напрямі, а відведення тепла

вздовж осі кабелю і труби, в який він прокладений, не відбувається.

У трифазних мережах прокладають трифазні групи однофазних кабелів, що для кожної із фаз погіршує умови відведення тепла до ґрунту. Це можна врахувати, вважаючи, що для кожної з фаз тепловий опір ґрунту втричі більше, ніж воно було б наявності лише однієї фази кабелю.

Для ізоляції зі зшитого поліетилену, яка найбільше часто застосовується для сучасних однофазних кабелів 6–500 кВ, у нормальному режимі роботи температура не має перевищувати 90 °С. Приймавши температуру жили $T_{\text{ж}} = 90$ °С, з рівняння теплового балансу знайдемо тривалий допустимий струм кабелю:

$$I_{\text{д90}} = \sqrt{\frac{T_{\text{ж}} - T_{\text{г}} - P_1 \cdot (0.5R_{\text{л}} + R_{\text{о}} + R_{\text{в}} + R_{\text{т}} + 3R_{\text{г}})}{K_{\text{п}}R_{\text{ж}}(R_{\text{л}} + R_{\text{о}} + R_{\text{в}} + R_{\text{т}} + 3R_{\text{г}}) + R_{\text{ж}} \left(\frac{P_{\text{е}}}{P_{\text{ж}}} \right) \cdot (R_{\text{о}} + R_{\text{в}} + R_{\text{т}} + 3R_{\text{г}})}} \quad (3.48)$$

де $T_{\text{г}}$ – температура ґрунту;

$R_{\text{ж}}$ – активний опір жили;

$K_{\text{п}}$ – коефіцієнт, що враховує зростання втрат у жилі кабелю з допомогою поверхневого ефекту;

P_1 – діелектричні втрати в ізоляції кабелю;

$P_{\text{е}}/P_{\text{ж}}$ – відношення, яке характеризує роль «паразитних» втрат в екранах кабелю на фоні «неминутих» втрат у жилах.

Існує три основних механізми передачі тепла від кабелю до труби через заповнений повітрям проміжок між ними - теплопровідність, конвекція, випромінювання. Найважливішими є теплопровідність і конвекція [9].

Раніше конвекція враховувалася не безпосередньо, а за рахунок внесення постійної поправки до теплопровідності повітря: питомий тепловий опір повітря було знижено від довідкового значення $\rho_{\text{п}} = 30$ К·м/Вт до експертно-прийнятого значення 10 К·м/Вт.

Внесемо зміни до методики, які дозволять точніше врахувати конвективний теплообмін між кабелем та трубою.

Потужність, відведена від кабелю до труби за рахунок теплопровідності повітря, що заповнює трубу, становить (з розрахунку на 1 м довжини):

$$\Delta P_{\Pi} = \frac{\Delta T}{R_{\Pi}} = \alpha_{\Pi} \cdot \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right)} \cdot \Delta T, \quad (3.49)$$

де $\alpha_{\Pi} = 1/R_{\Pi}$ – питома теплопровідність повітря, Вт/(м·К);

ΔT – різниця температур поверхні кабелю та труби.

Потужність, відведена від кабелю до труби за рахунок конвекції повітря (ПК), може бути оцінена (з розрахунку на 1 м довжини):

$$\Delta P_{\Pi K} = \alpha_{\Pi K} \cdot S \cdot \Delta T = \alpha_{\Pi K} \cdot (2\pi r_4) \cdot \Delta T, \quad (3.50)$$

де $\alpha_{\Pi K}$ – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, Вт/(м² · К);

$S = (2\pi \cdot r_4) \cdot 1$ – площа бічної поверхні ділянки кабелю довжиною 1 м.

Відносна роль конвекції повітря в охолодженні кабелю може бути оцінена як:

$$\frac{\Delta P_{\Pi K}}{\Delta P_{\Pi}} = \frac{\alpha_{\Pi K}}{\alpha_{\Pi}} \cdot \left[r_4 \cdot \ln\left(\frac{r_5}{r_4}\right) \right]. \quad (3.51)$$

Як правило, внутрішній діаметр труби для прокладання кабелю в 1,5-2,0 рази більше діаметра кабелю, тобто $r_5/r_4 = 1,5-2,0$, тоді $\ln(r_5/r_4) = 0,4-0,7$. Діаметр кабелю може становити до 5–10 см, а його радіус $r_4 = 0,025-0,05$ м. Теплопровідність повітря залежить від його температури і при температурі поверхні кабелю 80 °С може бути прийнята $\alpha_{\Pi K} = 0,03$ Вт/(м·К).

Коефіцієнт $\alpha_{ПК}$ залежить від температури повітря та багатьох інших факторів, врахувати які в загальному випадку неможливо.

Для кабелів при 80 °С пропонується приймати $\alpha_{ПК} = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Підставивши вказані цифри, знайдемо $\Delta P_{ПК} / \Delta P_{П} = 1,5-6,0$. Тобто, саме конвекція – головний механізм передачі тепла від кабелю до труби. Сумарна передача тепла через повітря між кабелем і трубою може бути визначена як:

$$\Delta P_{П} + \Delta P_{ПК} = \Delta P_{П} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{ПК}}{\Delta P_{П}} \right). \quad (3.52)$$

При порівнянні виразів $\Delta P_{П}$ та $\Delta P_{П} + \Delta P_{ПК}$ стає ясно, що конвекцію можна врахувати, якщо замість теплопровідності $\alpha_{П}$ використовувати величину $\alpha'_{П}$:

$$\alpha'_{П} = \alpha_{П} \cdot \left(1 + \frac{\Delta P_{ПК}}{\Delta P_{П}} \right) = \alpha_{П} \cdot \left(1 + \frac{\alpha_{ПК}}{\alpha_{П}} \cdot \left[r_4 \cdot \ln \left(\frac{r_5}{r_4} \right) \right] \right) = \alpha_{П} + \alpha_{ПК} \cdot \left[r_4 \cdot \ln \left(\frac{r_5}{r_4} \right) \right] \quad (3.53)$$

Це ж повною мірою стосується і зворотної величини - питомого теплового опору $\rho_{В} = 1/\alpha_{П}$, замість якого при обчисленні теплового опору повітря $R_{В}$, треба використовувати величину $\rho'_{В} = 1/\alpha'_{П}$.

Наведемо приклад розрахунку по скоригованій формулі для трифазної групи однофазних кабелів XRUNAKXS-WTC 1x2000RMS в ізоляції з XPLE напругою 110 кВ з алюмінієвою жилою 2000 мм² та екраном 150 мм². Прийнято такі дані: $r_1 = 0.028 \text{ м}$; $r_2 = 0.045 \text{ м}$; $r_3 = 0.048 \text{ м}$; $r_4 = 0.053 \text{ м}$.

$$\begin{aligned} r_5 &= 0.5 \cdot D_T - \frac{D_T}{SDR}, \\ r_6 &= 0.5 \cdot D_T, \end{aligned} \quad (3.54)$$

де D_T та SDR – зовнішній діаметр труби та її SDR (Standard Dimension Ratio) – відношення зовнішнього діаметра до товщини стінки.

Питомий тепловий опір ізоляції $\rho_I=3,5$ К·м/Вт, оболонки $\rho_O=3,5$ К·м/Вт. Температура ґрунту $T_G=15$ °С, глибина закладення кабелю $h=1,5$ м, труба має типовий для кабельних мереж $SDR=11$.

Результати розрахунків допустимого струму зведені у таблиці 1 залежно від двох основних факторів, що впливають: зовнішнього діаметра труби $D_T = 0,110- 0,315$ м та питомого теплового опору ґрунту $\rho_G = 1-3$ К·м/Вт.

Розрахунки табл. 3.3 виконані для випадку без втрат в екранах: $P_E/P_{Ж}=0$ та $P_E=0$, так як для кабелів класу напруги 110 кВ типовими є одностороннє заземлення екранів або їх транспозиція. Питомий тепловий опір труби та повітря $\rho_T=3$ К·м/Вт, $\rho_P=30$ К·м/Вт, коефіцієнт конвекції повітря $\alpha_{ПК}=5$ Вт/(м²·К). У випадках I та II труба відсутня, фази кабелю прокладені у відкритому ґрунті впритул один до одного (I) або на відстані D_T (II). При цьому питомий тепловий опір ρ_P і ρ_T прийняті такими ж, як ρ_G , що саме і означає відсутність повітря та полімерної труби.

У III випадку фази кабелю прокладені в трубах, розташованих зімкнутим трикутником. Відстань між осями фаз кабелю, таким чином, становитиме D_T .

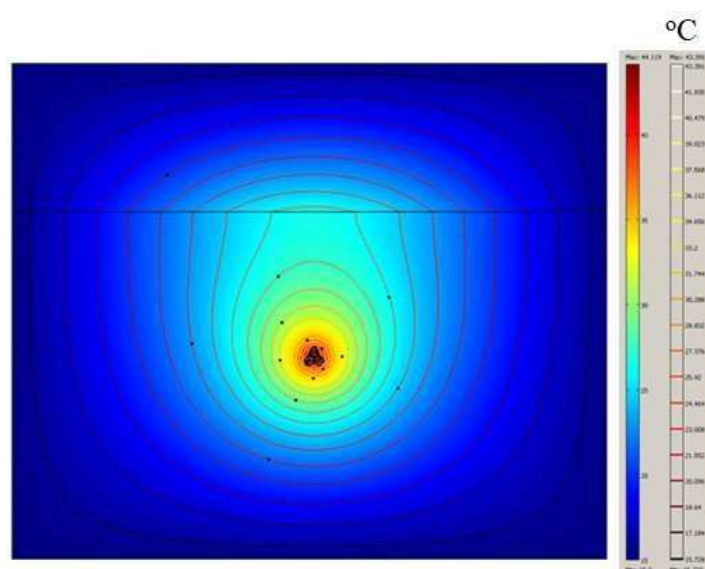


Рисунок 3.5 – Розподіл температури у перерізі КЛ при прокладанні в землі трикутником

Таблиця 3.3 – Тривалі допустимі струми трифазної групи однофазних кабелів 110 кВ 2000/150мм²

№	Діаметр труби	Питомий тепловий опір ґрунту ρ_r , К·м/ВТ				
		1	1.5	2	2.5	3
І. Фази кабелю прокладені в землі зімкнутим трикутником						
0	-	1057	890	782	706	648
ІІ. Фази кабелю прокладені в землі трикутником на відстані між осями рівній діаметру труби						
1	160	1112	940	828	748	687
2	225	1143	968	854	772	709
ІІІ. Фази кабелю прокладені в трубах зімкнутим трикутником						
1	160	982	864	780	716	665
2	225	1000	887	805	742	691

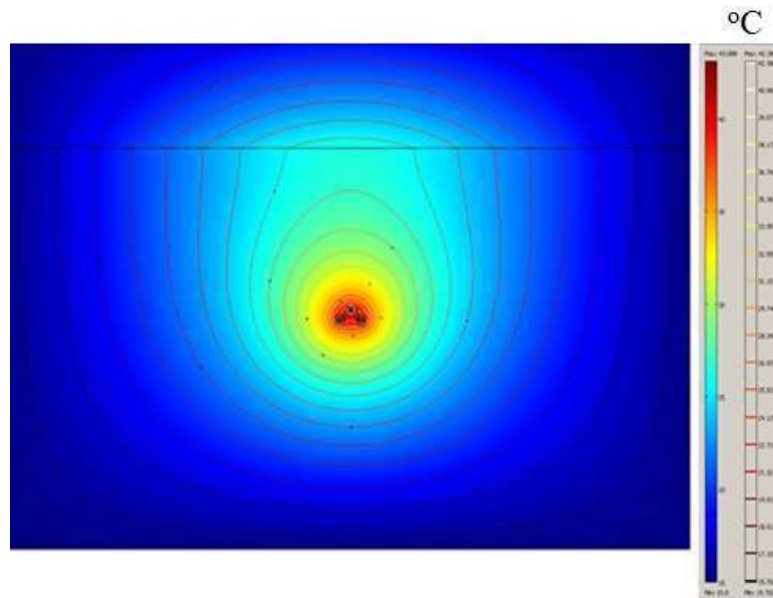


Рисунок 3.6 – Розподіл температури у перерізі КЛ при прокладанні в землі трикутником на відстані між осями рівній діаметру труби

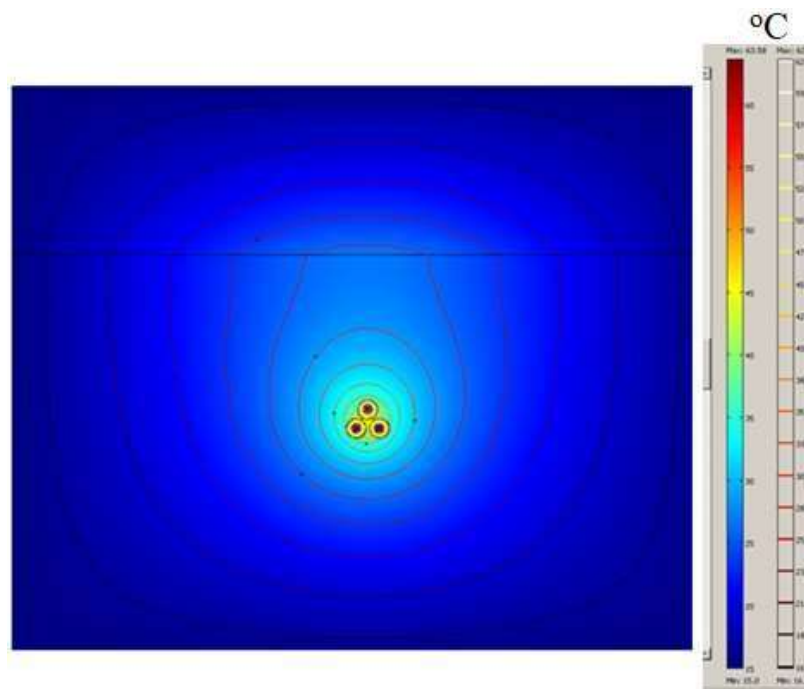


Рисунок 3.7 – Розподіл температури у перерізі КЛ при прокладанні в трубі зімкнутим трикутником

Питомий тепловий опір залізобетонного лотка становить близько 1–2 К·м/Вт, що близько до властивостей ґрунту. Тому висновки, які можна буде зробити на основі аналізу випадку І із табл. 3.1, повною мірою

відносяться не тільки до прокладання кабелю в ґрунті, а й до прокладання кабелю в залізобетонних лотках.

Таблиця 3.4 –Відносні значення допустимі струмів для кабелю

№	Діаметр труби, мм	Питомий тепловий опір ґрунту ρ_r , К·м/ВТ				
		1	1.5	2	2.5	3
$K_I=I_{II}/I_I$ – поправочний коефіцієнт на відстань між фазами						
1	160	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06
2	225	1.08	1.09	1.09	1.09	1.09
$K_{II}=I_{III}/I_{II}$ – поправочний коефіцієнт на труба						
1	160	0.88	0.92	0.94	0.96	0.97
2	225	0.87	0.92	0.94	0.96	0.97
$K=K_I \cdot K_{II}=I_{III}/I_I$ – поправочний коефіцієнт на прокладку кабелів в трубах						
1	160	0,93	0,97	1.0	1.01	1.03
2	225	0,95	1,0	1.03	1.05	1.07

У табл. 3.4 представлені відносні значення допустимих для кабелю струмів, аналіз яких дозволяє зробити кілька висновків, які є справедливими тільки в умовах розглянутого приклад для кабелю 110 кВ, але якісно справедливих для будь-яких КЛ, що не мають паразитних струмів та втрат потужності в екранах:

- у міру віддалення фаз кабелю один від одного пропускна здатність кабелю зростає (коефіцієнт $K_I = I_{II}/I_I$ від 1,05 до 1,09);
- поміщення кабелю в трубу, заповнену повітрям, лише незначно

знижує його пропускну здатність (коефіцієнт $K_2 = I_{III}/I_{II}$ від 0,88 до 0,97), тоді як серед проєктувальників поширений надмірно жорсткий коефіцієнт 0,9, однаковий незалежно від властивостей ґрунту та діаметра труби;

- заміна традиційного прокладання фаз кабелю зімкнутим трикутником на їх трубну прокладку може як зменшувати, так і збільшувати пропускну здатність КЛ (коефіцієнт $K = K_1 \cdot K_2 = I_{III}/I_I$ від 0,93 до 1,07);

- у ґрунтах з підвищеним питомим опором $\rho_r > 1,5-2,0 \text{ К}\cdot\text{м/Вт}$ заміна зімкнутого трикутника на трубну прокладку при правильному виборі діаметра труби може підвищити пропускну здатність КЛ до 12% (коефіцієнт $K = K_1 \cdot K_2 = I_{III}/I_I$).

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

У цьому розділі бакалаврської роботи розробляються заходи з охорони праці в процесі експлуатації кабельних ліній. Отже, на оперативно-ремонтний персонал, що здійснює ремонт і обслуговування кабельних ліній, впливають такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори [11, 12]:

- фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

- хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

- фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

4.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації

4.1.1 Технічні рішення з безпечної організації робочих місць на КЛ

Земляні роботи, пов'язані з ремонтом або прокладанням кабелю в зоні розташування підземних споруд та комунікацій, слід проводити з письмового дозволу керівників підприємства або цеху, відповідальних за експлуатацію цих споруд та комунікацій [13]. До дозволу слід додавати план з вказівкою про розміщення та глибину закладання комунікацій.

У разі пошкодження підземної споруди, яке спричиняє небезпеку для тих, хто працює, або у разі виявлення не зазначених на планах кабелів, трубопроводів, підземних споруд, боєприпасів керівник робіт повинен негайно припинити роботи у цьому місці і повідомити про те, що сталося, працівнику, який видав наряд, та організації-власнику виявленої (пошкодженої) споруди. Виконання робіт можна продовжити тільки після отримання дозволу від відповідних організацій. У разі виявлення у траншеях або котлованах запаху газу роботи в них слід негайно припинити, а працівників вивести з небезпечної зони. Роботи можна поновити тільки після усунення причин витікання газу.

Забороняється застосування машин та механізмів ударної дії ближче 5 м від траси кабелів, а землерийних машин - в межах охоронної зони КЛ. Застосування землерийних машин в межах охоронної зони КЛ дозволяється тільки під час проведення розкопок під наглядом працівників, які експлуатують цю лінію. У разі проведення розкопок безпосередньо над кабелем застосування землерийних машин та пневматичних інструментів, а також ломів та кирок допускається тільки на глибину, при якій до кабелю або захисного покриття залишається шар ґрунту не менше як 0,3 м. Подальше виймання ґрунту слід проводити вручну лопатами.

Місце робіт, де проводиться копання котлованів, траншей або ям, слід огородити. На огороженні слід встановити попереджувальні знаки і написи, а в нічний час – сигнальне освітлення. Під час копання траншей у слабкому або вологому ґрунті, коли є загроза обвалу, їхні стіни повинні бути надійно укріплені. У сипких ґрунтах роботи можна проводити без укріплення, але з укосами, що відповідають куту природного укосу ґрунту.

В ґрунтах з природною вологістю, у разі відсутності ґрунтових вод і розташованих поблизу підземних споруд, копання котлованів та траншей з вертикальними стінками без укріплення дозволяється на глибину не більше: 1 м – в насипних, піщаних та великоуламкових ґрунтах; 1,25 м – в супісках; 1,5

м – в суглинках і глинах. У щільних зв'язних ґрунтах траншеї з вертикальними стінками рити роторними та траншейними екскаваторами без встановлення укріплень допускається на глибину не більше 3 м. Забороняється у цьому разі працівникам спускатись в траншеї. В місцях траншеї, де необхідно перебувати працівникам, слід влаштовувати укріплення або робити укуси. Взимку розроблення ґрунту (крім сухого) на глибину промерзання допускається без укріплень.

Влаштування укріплень котлованів та траншей глибиною до 3 м, як правило, повинно бути інвентарним та виконуватись за типовими проектами.

Проведення робіт в котлованах та траншеях зі зволженими укусами дозволяється тільки після ретельного огляду керівником робіт (майстром) стану ґрунту, укусів.

Розкриті муфти слід закріплювати на дошці, що підвішена за допомогою дроту або тросів до перекинутих через траншею брусів, та закривати коробами. Одна стінка коробка повинна бути знімною та закріплюватись без використання цвяхів. На короби, що закривають відкопані кабелі, необхідно вивісити попереджувальні плакати або знаки безпеки.

Забороняється використовувати для підвішування кабелів сусідні кабелі, трубопроводи тощо. Кабелі слід підвішувати, не допускаючи їх зміщення. Перед розкриванням муфт або розрізанням кабелю необхідно впевнитись в тому, що робота буде виконуватись на кабелі, який підлягає ремонту, що цей кабель вимкнено і вжито інших технічних заходів, необхідних для допуску до робіт на ньому. На робочому місці розміщення кабелю, що підлягає ремонту, слід визначити:

- у разі прокладання кабелю в тунелі, колекторі, каналі та інших кабельних спорудах або по стінках будівель – простеженням, звірюванням розкладки з кресленнями та схемами, перевіркою за бирками;

- у разі прокладання кабелю в землі – звірюванням його розміщення з кресленнями прокладання. З цією метою слід попередньо викопати

контрольну траншею (шурф) впоперек пучка кабелів, яка дає змогу бачити всі кабелі. В усіх випадках, коли відсутнє видиме пошкодження кабелю, слід застосовувати кабелепошукові апарати.

Перед розрізуванням кабелю або розкриванням з'єднувальної муфти необхідно упевнитись у відсутності напруги за допомогою спеціального пристосування. Це пристосування повинно забезпечити проколювання або розрізування броні і оболонки кабелю до жил із замиканням їх між собою і заземленням. Спеціальне пристосування, як правило, повинно бути з дистанційним керуванням. У тунелях, колекторах, колодязях та інших кабельних спорудах застосовувати спеціальні пристосування без дистанційного керування не допускається. Для заземлення спеціального дистанційного пристосування слід застосовувати заземлювач, заглиблений у ґрунт на глибину не менше 0,5 м.

Якщо внаслідок пошкоджень кабелю залишились відкритими всі струмовідні жили, відсутність напруги можна перевіряти безпосередньо показником напруги без проколювання кабелю. У разі використання пристосування у вигляді ізолювальної штанги з голкою і різальним наконечником необхідно застосовувати спеціальний металевий захисний екран. Для проколювання кабелю слід надягати діелектричні рукавички та захисні окуляри. У цьому разі стояти слід на ізолювальній основі зверху траншеї якомога далі від кабелю, що проколюється. Проколювання кабелю повинні здійснювати два працівники: допускатч та керівник робіт; один з них безпосередньо проколює кабель, а другий спостерігає. У разі, якщо керівник робіт суміщає обов'язки допускатча, другим працівником може бути працівник з групою IV.

На внутрішніх кабельних лініях електростанцій та підстанцій, де довжина та спосіб прокладання кабелів дозволяють, користуючись кресленнями, бирками, кабелепошуковим апаратом, точно визначати кабель, що підлягає

ремонту, допускається за рішенням працівника, який видав наряд, не проколювати кабель перед його розрізуванням або розкриванням муфти.

Розкривати з'єднувальні муфти та розрізувати кабель у тому разі, коли попереднє проколювання не робиться, слід заземленим інструментом, надягнувши діелектричні рукавички і захисні окуляри та стоячи на ізолювальній основі. Після попереднього проколювання ті самі операції на кабелі можна виконувати без зазначених додаткових заходів безпеки.

4.1.2 Електробезпека

Основні технічні рішення щодо запобігання електротравмам:

- 1) виконання технічних заходів під час підготовки робочого місця,
- 2) застосування під час обслуговування електроустановок електрозахисних засобів.

1) Під час підготовки робочого місця для роботи, яка вимагає знімання напруги, слід виконати у зазначеній послідовності такі технічні заходи:

- провести необхідні вимкнення і вжити заходів щодо запобігання помилковому або самочинному вмиканню комутаційної апаратури;
- вивісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційної апаратури. За необхідності струмопровідні частини слід огорожувати;
- приєднати до "землі" переносні заземлення;
- перевірити відсутність напруги на струмопровідних частинах, на які слід встановити заземлення. Якщо переносні заземлення планується ставити поблизу струмопровідних частин, що не входять в зону робочого місця, то їх огороження слід встановити до перевірки відсутності напруги та заземлення;
- встановити заземлення (увімкнути заземлювальні ножі, приєднати до вимкнених струмопровідних частин переносні заземлення) безпосередньо після перевірки відсутності напруги та вивісити плакати "Заземлено" на приводах вимикальних комутаційних апаратів;

- огородити, у разі необхідності, робочі місця або струмопровідні частини, що залишилися під напругою, і вивісити на огороженнях плакати безпеки. Залежно від місцевих умов струмопровідні частини огорожують до або після їх заземлення.

2) Під час обслуговування електроустановок повинні застосовуватись засоби захисту від ураження електричним струмом, від впливу електричного поля, а також засоби індивідуального та колективного захисту. Ізолювальні електрозахисні засоби поділяються на основні і додаткові. До основних ізолювальних електрозахисних засобів, які повинні застосовуватись в електроустановках напругою понад 1000 В, відносяться: ізолювальні штанги всіх видів, ізолювальні кліщі, електровимірювальні кліщі, показчики напруги, пристрої для створення безпечних умов праці під час проведення випробувань і вимірювань в електроустановках (показчики напруги для фазування, показчики пошкодження кабелів та ін.); до додаткових – діелектричні рукавички, діелектричне взуття, діелектричні килими, ізолювальні підставки, ізолювальні накладки, ізолювальні ковпаки, штанги для перенесення та вирівнювання потенціалу, сигналізатори напруги, захисні огороження (щити, ширми), переносні заземлення, плакати та знаки безпеки та інші засоби захисту.

Крім наведених вище засобів захисту в електроустановках повинні застосовуватись такі ЗІЗ: захисні каски – для захисту голови; захисні окуляри і щитки – для захисту очей і обличчя; протигази і респіратори – для захисту органів дихання; рукавиці – для захисту рук; запобіжні пояси та страхувальні канати.

Вибір необхідних електрозахисних засобів, засобів захисту від дії ЕП, а також ЗІЗ регламентується [13], а також іншими відповідними нормативними документами (НД) з урахуванням місцевих умов. У разі застосування основних ізолювальних електрозахисних засобів достатньо використовувати один додатковий засіб, крім випадків, що обумовлені в цих Правилах. У разі

необхідності захисту працівника від напруги кроку дозволяється використовувати діелектричне взуття без застосування основних засобів захисту.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат виробничих приміщень

Основними нормативними документами, що регламентують параметри мікроклімату виробничих приміщень, є ДСН 3.3.6.042-99. Мікроклімат приміщення характеризується наступними чинниками: температурою повітря, відотною вологістю повітря, швидкістю руху повітря, інтенсивністю теплового випромінювання. Оперативно-ремонтні роботи з обслуговування кабельних ліній відносяться до категорії Пб по важкості праці [16]. Енерговитрати за цією категорією становлять – до 140-174Вт.

Допустимі норми температури, відотної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Допустимі норми параметрів повітря

Період року	Категорія робіт	Температура, °С		Відносна вологість	Швидкість руху, X
		Верхня межа	Нижня межа		
Холодний	Пб	20-24	17-25	75	не більше 0,2
Теплий		21-28	19-30	55 при 27 °С	0,1-0,3

4.2.2 Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується гранично допустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [6]. При здійсненні випробувальних робіт виділяється пил нетоксичний. При роботі системи вентиляції, провітрюванні в приміщення може попадати пил та інші шкідливі

речовини, які виділяються при оздоблювальних технологічних процесах в будівництві, що знаходяться в повітрі навколишнього середовища. Їх ГДК відповідно наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Гранично допустимі концентрації шкідливих речовин для повітря атмосфери, в робочій зоні для обслуговуючого персоналу

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Пил	0,5	0,15	4

Для забезпечення складу повітря робочої зони відповідно до ДСН [17] проектом передбачені наступні рішення [17]: застосування пиловідсмоктуючих агрегатів з рукавними фільтрами, які встановленні безпосередньо на ділянках біля обладнання із яких очищене повітря поступає у виробниче приміщення; необхідно проводити контроль за ГДК шкідливих речовин у приміщенні; застосовувати природну вентиляцію: організовану та неорганізовану.

4.2.3 Виробниче освітлення

Характеристика зорових робіт в процесі досліджень – середньої точності [8]. Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Допустимі рівні виробничого освітлення наведені в таблиці 4.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення, використовують загальне штучне освітлення, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від

величини природної освітленості.

Таблиця 4.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменшій або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

4.2.4 Виробничий шум

Джерелом шуму є обладнання, машини, механізми та верстати – механічний шум.

Під час виконання дослідницьких робіт виникає виробничий шум з такими характеристиками: за характером спектру – широкосмуговий з безперервний спектром шириною більше октави; за тональною характеристикою постійний; за походженням – механічний і гідродинамічний.

Допустимі рівні звукового тиску, рівні звуку і еквівалентні рівні звуку на робочих місцях приймаються за вимогами ДСН 3.3.6.037 [19] і наведені в таблиці 4.4.

Для зменшення рівня шуму до допустимого двигуни машин і механізмів виконуються в металевому кожусі, а також виконують змащення, застосовують пластмасові деталі, використовують протишумні навушники, які закривають вушну раковину.

Таблиця 4.4 – Допустимі рівні звукового тиску

Робоче місце	Рівні звукового тиску в октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц									Рівні звукового тиску, ДБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
На постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях та на території підприємства	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

4.2.5 Виробничі вібрації

Допустимі рівні загальної вібрації на постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях [20] наведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація:	<u>1,3</u>	<u>0,45</u>	<u>0,22</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>	<u>0,2</u>	-	-	-	-
На постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	108	99	93	92	92	92				

В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, м/с 10^{-2} , знаменнику - логарифмічні рівні вібрації, дБ.

Основними методами колективного віброзахисту є зниження вібрації шляхом дії на джерело виникнення: відстрочка від режиму резонанс;

динамічне гасіння коливань, заміна конструктивних елементів уставок і будівельних конструкцій. Засоби індивідуального захисту діляться на засоби для ніг, рук та тіла працюючого.

4.3. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують Правила пожежної безпеки в Україні [21, 22]. Пожежо- вибухонебезпечність речовин і матеріалів визначається за ДСТУ 8829: 2019 [23], за якою визначається категорія приміщень за вибуховою та пожежною безпекою [24].

Приміщення п/ст за вибухонебезпекою та пожежонебезпекою відноситься до категорії Д – речовини і/або матеріали, що зазначені вище для категорій приміщень В (крім горючих газів, горючих пилу і/або волокон), а також негорючі речовини і/або матеріали в холодному стані (за температури навколишнього середовища), за умов, що приміщення, в яких знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються) зазначені вище речовини і/або матеріали, не відносяться до категорій А, Б або В, з зонами П-ІІІ (місця, де зберігаються тверді горючі речовини).

Будівля, в якій розташована п/ст, характеризується ІІІ ступенем вогнестійкості. До ІІІ ступеня вогнестійкості відносяться будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону, залізобетону. Для перекриттів дозволяється застосовувати дерев'яні конструкції, захищені штукатуркою або негорючими листовими, плитними матеріалами, або матеріалами груп горючості Г1 (низької горючості), Г2 (помірної горючості). До елементів покриттів не висуваються вимоги щодо межі вогнестійкості, поширення вогню, при цьому елементи горищного покриття з деревини повинні мати вогнезахисну обробку. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвилинах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2016 [25] наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	перекрыття між поверховими (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, настили, прогони	балки, ферми, арки, рами
III	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M1	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M1	Не нормуються	

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2016 [25] наведено в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи протипожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбуршлюзу, не нижче
Стіни	3	REI 45	2	2
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	3	REI 45	2	1

Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами слід приймати за

таблицею 4.8 (чисельник). В умовах забудови, що склалася, протипожежні відстані між житловими будинками та від житлових будинків до будівель і споруд іншого призначення слід визначати згідно з протипожежними вимогами даних норм, наведеними у таблиці 4.8. Протипожежні відстані від житлових, громадських, адміністративно-побутових будинків промислових підприємств, гаражів до виробничих, складських будинків і споруд слід приймати за таблицею 4.8 (знаменник) [25].

Таблиця 4.8 – Протипожежні відстані між житловими, громадськими, адміністративно-побутовими будинками промислових підприємств, гаражами, а також до виробничих будинків і споруд

Ступінь вогнестійкості будинку	Відстані при ступені вогнестійкості будинків, м		
	I, II	III	IV, V
III	8/9	8/12	10/15

В приміщенні п/ст встановлено 15 вогнегасників ВП-5 [26].

ВИСНОВОК

Підтримка належного технічного стану ліній електропередач має важливе значення для надійності електропостачання. На даний момент ми бачимо, що технічний стан електричних мереж знаходиться в поганому стані через тривалу експлуатацію ліній та заниженого фінансування їх оновлення. Заміна застарілого обладнання, врегулювання небалансів електроенергії в мережі, підвищення стабільності системи та надійності електропостачання є дуже важливим завданням виконання якого призведе до підвищення якості електричної енергії.

Прокладання кабельних трас в полімерних трубах – це сучасний високотехнологічний метод побудови електричних мереж, який має переваги перед прокладанням високовольтних кабелів у відкритому ґрунті або в залізобетонних каналах. Такий метод характеризується низько-об'ємними земляними роботами в умовах міської забудови та короткими термінами будівництва. Запропонована узагальнена формалізація пропускної здатності високовольтних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Зокрема, показано, що в номінальному режимі роботи при температурі жили кабелю $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, що є прийнятним для ізоляції зі зшитого поліетилену, температура оболонки кабелю може досягати $75\ldots 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ і тому в конструкції кабелів не можна використовувати полімерні труби для холодної води. Труби холодного водопостачання для прокладання в них кабелю, виконуються з поліетилену низького тиску і розраховані на температуру не вище $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Виконано аналіз методів прокладання кабельних ліній з ізоляцією зі зшитого поліетилену.

Використано метод оцінки теплових розрахунків кабельних мереж з однофазними кабелями, який враховує два механізми теплопередачі: за рахунок теплопровідності та конвекції. Показано, що вплив труб на пропускну здатність кабельної лінії залежить від ряду факторів (діаметр труби, параметри

грунту тощо), а універсальний поправочний коефіцієнт 0,9 для труб, який часто використовується проєктувальниками, є невірним. Ряд оцінок, зроблених на прикладі кабелю 110 кВ, показали, що цей коефіцієнт коливається в широкому діапазоні значень від 0,88 до 0,97. При виборі розміру труби прийнято дотримуватися наступного правила: внутрішній діаметр повинен бути не менше ніж в півтора рази більше діаметра встановленого кабелю ($r_5/r_4 \geq 1,5$).

Встановлено, що заміна традиційної прокладки кабелю у відкритому ґрунті чи в залізобетонних лотках на трубну за певних умов може призвести до збільшення пропускної здатності до 10%. Це пояснюється тим, що при великих діаметрах труб вони отримують значну площу контакту з землею і добре охолоджуються.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H. [et al.]. Long-life XLPE-insulated power cable // Proceedings of The Jicable International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, 2007. URL: https://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf.
2. Liu Xin-min. Cross-linked polyethylene experimental study. 2003. Ocean University of China, 18. Nishida Y., Itagaki K., Yamaji Y., Konishi M. [et al.].
3. Non-destructive diagnosis technique for aging of cables used in nuclear power plants // Proceedings of The 7th International conference on nuclear engineering, Tokyo, 1999. Pleşa I., Noţingher P., Stancu C., Wiesbrock F. [et al.]. Polyethylene nanocomposites for power cable insulations // Polymers. 2018. Vol. 11, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11010024>.
4. Приватне Акціонерне Товариство «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НЕК «Укренерго»). План розвитку системи передачі на 2021-2030 роки, схвалений постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 57 від 20.01.2021.
5. Приватне Акціонерне Товариство «Національна енергетична компанія «Укренерго» (НЕК «Укренерго»). Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту на електричну енергію та забезпечення необхідного резерву у 2020 році.
6. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг у 2020 році.
7. Кирик В. В. Електричні мережі та ситеми: підручник /В.В. Кирик. – Київ:КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. – 324 с. ISBN 978-966-990-031-9.

8. Distributed fiber optic sensing and dynamic rating of power cables by Anders, George J. Cherukupalli. IEEE Press, 2020, 243 pp.

9. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Гончаренко І.С., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Кириленко О.В., Лук'яненко Л.М., Миколаєць Д.А., Осипенко К.С., Павловський В.В., Рибіна О.Б., Стелюк А.О., Танкевич С.Є., Трач І.В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: монографія / за заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.

10. А.В., Грицюк Ю.В., Грицюк І.В., Давиденко Л.В., Коменда Н.В., Волинець В.І. Підвищення рівня ефективності енергоспоживання в електротехнічних пристроях і системах: монографія. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. 268 с.

11. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

12. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

13. ДНАОП 1.1.10-1.01-97 Правила безпечної експлуатації електроустановок. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=21826.

14. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

15. НПАОП 40.1-1.32-01 (ДНАОП 0.00-1.32-01) Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0272203-01#Text>.

16. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.
17. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.
18. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885
19. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>.
20. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/rada/show/va039282-99>.
21. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.
22. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.
23. ДСТУ 8829:2019 Пожежовибухонебезпечність речовин і матеріалів. Номенклатура показників і методи їхнього визначення. Класифікація. URL: <https://www.alutal.com.ua/wp-content/uploads/2021/02/dstu-8829-2019-1.pdf>.
24. ДСТУ Б В.1.1-36:2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпек. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_36/5-1-0-1759.
25. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7-2002.pdf.
26. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА НАЯВНІСТЬ
ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Дослідження умов експлуатації кабельних ліній електропередавання з полімерною ізоляцією»

Тип роботи: Бакалаврська дипломна робота
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра електричних станій та систем, факультет електроенергетики та електромеханіки
(кафедра, факультет)

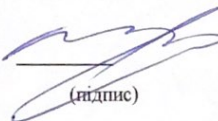
Показники звіту подібності Unichек

Оригінальність 87% Схожість 13%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

- ☒ 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
- ☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

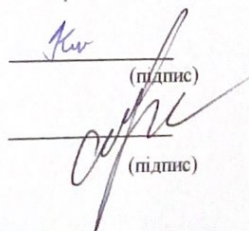

(підпис)

Вишневецький С.Я.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unichек щодо роботи.

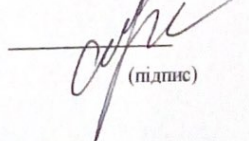
Автор роботи


(підпис)

Кашевський І.М.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Малогулко Ю.В.

(прізвище, ініціали)

Вінницький національний технічний університет
Кафедра електричних станцій та систем

«Дослідження умов експлуатації кабельних ліній
електропередавання з полімерною ізоляцією»

Виконав: ст. гр. 2ЕЕ-206 Кашевський І.М.
Керівник: к.т.н., доцент Малогулко Ю.В.

Вінниця 2024

Актуальність та задачі дослідження

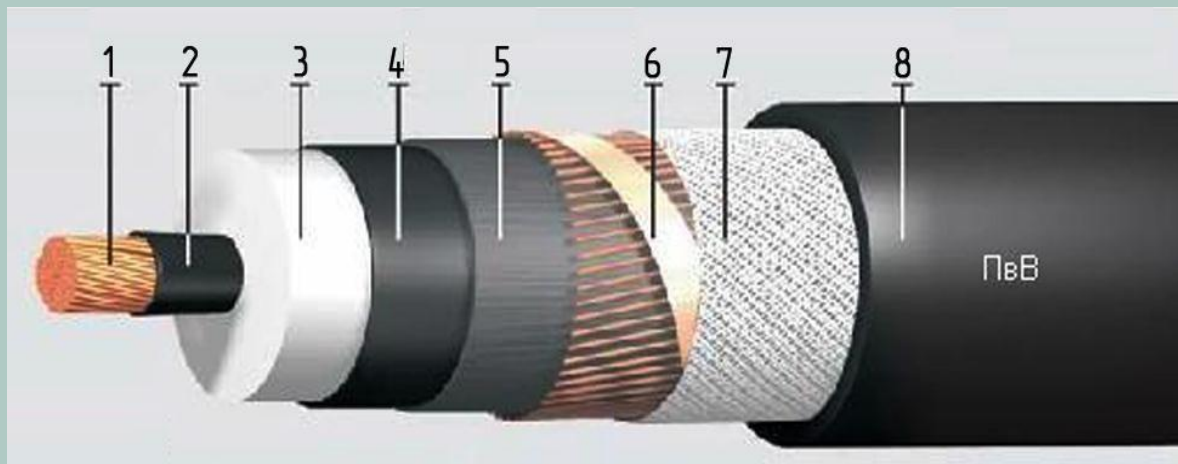
Кабельні мережі 10 - 110 кВ є основою систем енергопостачання промислових підприємств, комунального та побутового електроспоживання, тому наукові, технічні, економічні та організаційні завдання підвищення надійності їх роботи можна вважати важливою науково-технічною проблемою, яка потребує ретельного дослідження та коректного вирішення.

Підвищення надійності кабельних ліній (КЛ) з полімерною ізоляцією багато в чому визначає вдосконалення методів їх проектування, виробництва та експлуатації, реалізація якого дозволить підвищити їхню пропускну здатність, знизити аварійність при впливах на ізоляцію КЛ потужних електромагнітних перешкод, мінімізувати втрати, покращити їх експлуатаційні та характеристики тощо.

При вдосконаленні експлуатаційних властивостей КЛ із полімерною ізоляцією найбільший інтерес становлять проблеми забезпечення захисту ізоляції КЛ від грозових перенапруг при впливах струмів блискавок, що надходять з повітряних ліній (ПЛ), а також внутрішніх, пов'язаних з роботою комутаційних та захисних апаратів. Їх обмеження дозволяє забезпечити необхідний ресурс полімерної ізоляції КЛ і запобігти можливому недовідпуску електроенергії в жорстких умовах резервування в системах електропостачання.

Не менш важливим є вивчення теплових процесів, що проходять в КЛ з полімерною ізоляцією, облік яких при проектуванні дозволяє забезпечити необхідну пропускну здатність при мінімальному перерізі жили КЛ.

Конструкція одножильного кабелю з полімерною ізоляцією



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

Ізоляційні матеріали кабельних ліній електропередавання напругою 10-110 кВ

4

Переваги зшитого поліетилену (ЗПЕ):

- ☐ висока пропускна здатність;
- ☐ низька вага, менший діаметр та радіус вигину;
- ☐ низька пошкоджуваність;
- ☐ поліетиленова ізоляція має малі значення щільності, відносної діелектричної проникності та коефіцієнта діелектричних втрат;
- ☐ прокладання на складних трасах;
- ☐ монтаж без використання спеціального обладнання;
- ☐ значне зниження собівартості прокладки.

Застосування ЗПЕ у порівнянні з традиційною в полівінілхлоридною ізоляцією дозволяє:

- використовувати жили меншого перерізу при передачі того ж перетоку потужності;
- збільшити тривало допустиму температуру нагріву жил кабелів до 90 °С;
- збільшити тривало допустиму температуру нагріву жил кабелів при короткому замиканні до 250 °С.

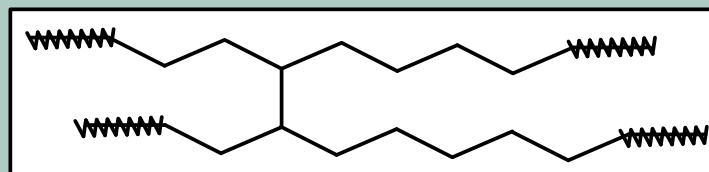
Порівняння характеристик твердої ізоляції КЛ

Характеристики	Види			Коментарі
	ЕПГ ізоляція	ЗПЕ ізоляція	Паперова просочена ізоляція	
Температура жили при роботі в номінальному режимі, °C	до 105	до 90	до 60-85	При використанні однакових перерізів, навантаження струму КЛ з ЕПГ ізоляцією вище.
Температура жили при перенавантаженні, °C	105-140	0	90	Найважливіший показник в стаціонарних післяаварійних режимах.
Температура жили при КЗ (до 5 сек), °C	250	250	200	Найважливіший показник в аварійних режимах КЗ.
Мінімальна температура прокладки без попереднього прогріву), °C	-15 (випускаються зразки, призначені для -40)	-15	0	Для ЗПЕ та ЕПГ ізоляції зовнішня оболонка ГІВХ або безгалогенна композиція.
Температурний діапазон експлуатації, °C	-60 – +50	-50 – +50	-50 – +50	Можливо використання в землі та в повітрі при кліматичних умовах ХЛ.
Питомий термічний опір, м²·К/Вт	0,95 (добре)	0,82 (середнє)	0,75 (задовільно)	Високий термічний опір понижує ризик деформації в ізоляції кабелю.
Стійкість до випромінювання (світло, УФ, ІК, Р, тощо)	Додаткового захисту не потребує	спеціальне покриття та екран	Немає даних	Необхідна для прокладання у відкритих місцях на повітрі та приміщеннях. Під час прокладання в ґрунті відсутнє випромінювання.
Стійкість до масла, %	0,1	0,7	1,5	Для «брудних» умов. Стійкість до набухання та розчинення.
Радіуси вигину неброньованого екранованого кабелю, гнучкість (Д-зовнішній діаметр кабелю)	7-А	15-Д	25-Д	Висока гнучкість кабелю скорочує час установки та спрощує монтаж КЛ.
Рівні прокладки	Без обмежень	Без обмежень	Не більше 15 м	В кабелях з твердою ізоляцією відсутнє обмеження по рівням прокладки
Нерозповсюджене горіння («Кисневий індекс» КІ)	19 (добре)	18 (середнє)	>20,8 (чудово)	Матеріали КІ<21 є горючими матеріалами та можуть горіти.
Тангенс кута діелектричних втрат (tgδ) при температурі 80°C	7-Ю ¹²	8-Ю ¹²	6-Ю ¹²²	Втрати активної потужності в діелектрику пропорційні tgδ.
Водний трінінг (трінінгостійкість)	Хороша стійкість	При використанні ізоляції з ЗПЕ немає необхідності в присадках, що забезпечують стійкість до водного трінігу	Середня стійкість	Деревоподібні тріщини та порожнини довільної форми при наявності води на поверхні ізоляції, а також при наявності включень води через недосконалість технології виготовлення.
Застосування в мережах з ізольованою нейтраллю – стійкість до руйнування при однофазному замиканні на землю	Хороша	Погана	Хороша	При виникненні замикання можливі значні пошкодження ізоляції ЗПЕ та виникнення короткого замикання.
Застосування в вибухо-небезпечних зонах	Так	Ні (п.7.3.102 ПУЕ)	Так	Кабель з ЕПР ізоляції можна використовувати в вибухо-небезпечних зонах.
Строк служби	не менше 50 років	не менше 30 років	не менше 30 років	Заявлений строк служби забезпечується при недопусканні висихання ПІ та зволоження ізоляції з ЗПЕ.
Витривалість при деформації та ударах	Так	Ні	Ні	Знижує ризик пошкодження кабелю при транспортуванні та прокладанні

Переваги кабелів з ізоляцією із ЗПЕ перед кабелями з ППО

- велика пропускна спроможність за рахунок збільшення допустимої температури жили (допустимі струми навантаження залежно від умов прокладання на 15-30% більше, ніж у кабелю з ППО);
- більший струм КЗ, що витримується;
- менша вага, діаметр і радіус вигину, що забезпечує легкість прокладання кабелю, як у кабельних спорудах, так і в землі на трасах будь-якої складності;
- можливість вести монтажні роботи при прокладанні кабелю при температурах до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ без попереднього підігріву, завдяки використанню полімерних матеріалів для ізоляції та оболонки;
- низька питома пошкоджуваність, що забезпечує зниження витрат на ремонтно-відновлювальні роботи та зменшення недовідпуску електроенергії.
- відсутність рідких компонентів, що зменшує час прокладання та вартість монтажних робіт;
- велика потужність, що передається (однофазна конструкція має перетин $800 - 1000\text{ мм}^2$ і більше);
- великі будівельні довжини (до 3 км);
- тривало допустима температура ($90\text{ }^{\circ}\text{C}$) в 1,5 рази, допустиме нагрівання в аварійному режимі ($130\text{ }^{\circ}\text{C}$) $\sim$ в 1,5 рази, гранично допустима температура при протіканні струму КЗ ($250\text{ }^{\circ}\text{C}$) на 25% більше, ніж для відповідних кабелів із ППО.

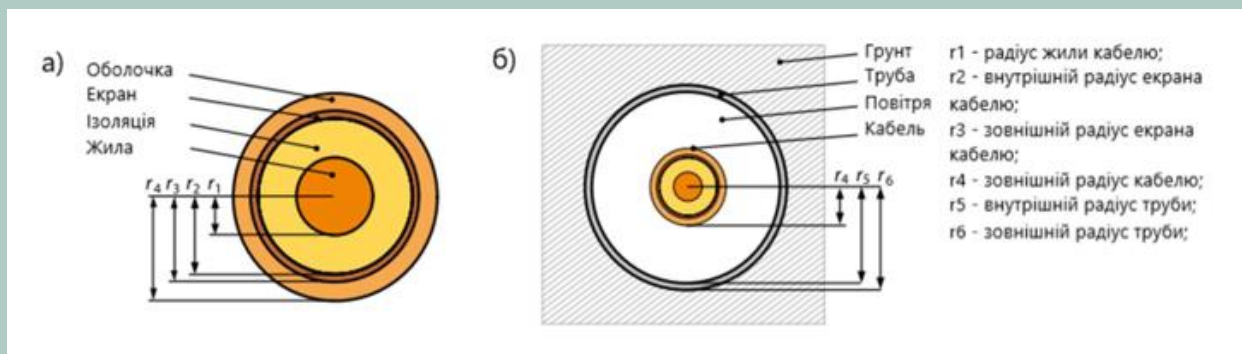
Особливості зшивання поліетилену для головної ізоляції кабельних ліній напругою 10-110 кВ



Структура поліетилену, зшитого за пероксидною або радіаційною технологією

При виробництві застосовується три основних промислових способи зшивання поліетилену, в залежності від яких зшитий поліетилен індексується відповідною літерою. Це пероксидний, силановий та радіаційний процеси зшивання. У європейських стандартах прийнято позначення, відповідно: PEX-A, PEX-B, PEX-C.

Тепловий розрахунок кабельної лінії електропередавання



Силовий однофазний кабель, прокладений у поліетиленовій трубі в ґрунті; а) конструкція та параметри кабелю; б) спосіб прокладання та параметри труби

Прокладання кабельних трас в полімерних трубах – це сучасний високотехнологічний метод побудови електричних мереж, який має переваги перед прокладкою кабелів у відкритому ґрунті або в залізобетонних каналах: низькі земляні роботи та висока швидкість будівництва.

Підтримка належного технічного стану ліній електропередач має важливе значення для надійності електропостачання. На даний момент ми бачимо, що технічний стан електричних мереж знаходиться в поганому стані через тривалу експлуатацію ліній та заниженого фінансування їх оновлення. Заміна застарілого обладнання, врегулювання небалансів електроенергії в мережі, підвищення стабільності системи та надійності електропостачання є дуже важливим завданням виконання якого призведе до підвищення якості електричної енергії.

Прокладання кабельних трас в полімерних трубах – це сучасний високотехнологічний метод побудови електричних мереж, який має переваги перед прокладанням високовольтних кабелів у відкритому ґрунті або в залізобетонних каналах. Такий метод характеризується низько-об'ємними земляними роботами в умовах міської забудови та короткими термінами будівництва. Запропонована узагальнена формалізація пропускної здатності високовольтних кабелів з ізоляцією зі зшитого поліетилену. Зокрема, показано, що в номінальному режимі роботи при температурі жили кабелю 90 °С, що є прийнятним для ізоляції зі зшитого поліетилену, температура оболонки кабелю може досягати 75...85 °С і тому в конструкції кабелів не можна використовувати полімерні труби для холодної води. Труби холодного водопостачання для прокладання в них кабелю, виконуються з поліетилену низького тиску і розраховані на температуру не вище 40 °С. Виконано аналіз методів прокладання кабельних ліній з ізоляцією зі зшитого поліетилену.

Використано метод оцінки теплових розрахунків кабельних мереж з однофазними кабелями, який враховує два механізми теплопередачі: за рахунок теплопровідності та конвекції. Показано, що вплив труб на пропускну здатність кабельної лінії залежить від ряду факторів (діаметр труби, параметри ґрунту тощо), а універсальний поправочний коефіцієнт 0,9 для труб, який часто використовується проєктувальниками, є невірним. Ряд оцінок, зроблених на прикладі кабелю 110 кВ, показали, що цей коефіцієнт коливається в широкому діапазоні значень від 0,88 до 0,97. При виборі розміру труби прийнято дотримуватися наступного правила: внутрішній діаметр повинен бути не менше ніж в півтора рази більше діаметра встановленого кабелю ($r_5/r_4 \geq 1,5$).

Встановлено, що заміна традиційної прокладки кабелю у відкритому ґрунті чи в залізобетонних лотках на трубну за певних умов може призвести до збільшення пропускної здатності до 10%. Це пояснюється тим, що при великих діаметрах труб вони отримують значну площу контакту з землею і добре охолоджуються.