

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра «Електротехнічні системи та енергетичний менеджмент»

“Допущено до захисту”
Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ
к.т.н., професор
_____Петро ПЛЕШКОВ
“__” _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ** **ВИЩОЇ ОСВІТИ**

на тему:

«Дослідження поточного стану витрати ресурсу ізоляції силового кабелю в процесі його експлуатації»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ЕЕ-22М
ОПП «Електротехнічні системи
електроспоживання»
спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

_____ Владислав ВІЛЬЧИНСЬКИЙ

«__» _____ 2023 р.

Керівник роботи доцент, канд. техн. наук,

_____ Руслан ТЕЛЮТА

«__» _____ 2023 р.

Рецензент _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра електротехнічних систем та енергетичного менеджменту

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма Електротехнічні системи електроспоживання

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою ЕТС та ЕМ

к.т.н., професор

_____ Петро ПЛІШКОВ

“ ____ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Вільчинський Владислав Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Дослідження поточного стану витрати ресурсу ізоляції силового кабелю в процесі його експлуатації

Investigation of the current state of power cable insulation life consumption during its operation

2. керівник роботи (проекту) Телюта Руслан Васильович, к.т.н., доцент

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

3. Строк подання студентом роботи до захисту 18.12.2023 р

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту) Метою роботи підвищення надійності силових кабелів за рахунок використання методу визначення витрати ресурсу ізоляції шляхом удосконалення математичних моделей діагностування при дослідженні їх експлуатаційних режимів. Завдання роботи: 1. Провести аналіз ресурсозберігання в силових кабельних лініях; 2. Проаналізувати методи та параметри діагностування технічного стану силових кабелів в процесі експлуатації; 3. Провести теоретичне дослідження витрати ресурсу ізоляції силового кабелю; 4. Розробити систему діагностування експлуатаційних режимів роботи силового кабелю; 5. Розглянути та запропонувати заходи з охорони праці.

5. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
<i>Охорона праці</i>	<i>к.т.н., доц. Савеленко І.В.</i>		

6. Дата видачі завдання 09. 10. 2023 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Видача та узгодження тематики роботи</i>	<i>9.10.2023</i>	
2	<i>Складання змісту магістерської роботи</i>	<i>16.10. 2023</i>	
3	<i>Вступ. Провести аналіз ресурсозберігання в силових кабельних лініях</i>	<i>31.10.2023</i>	
4	<i>Проаналізувати методи та параметри діагностування технічного стану силових кабелів в процесі експлуатації</i>	<i>10.11. 2023</i>	
5	<i>Провести теоретичне дослідження витрати ресурсу ізоляції силового кабелю</i>	<i>20.11. 2023</i>	
6	<i>Розробити систему діагностування експлуатаційних режимів роботи силового кабелю</i>	<i>30.11. 2023</i>	
7	<i>Розглянути та запропонувати заходи з охорони праці</i>	<i>15.12. 2023</i>	
8	<i>Висновки</i>	<i>20.12. 2023</i>	
9	<i>Перелік посилань</i>	<i>21.12. 2023</i>	
10	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>25.12. 2023</i>	
11	<i>Оформлення презентації магістерської роботи та подання магістерської роботи до захисту</i>	<i>28.12. 2023</i>	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2023 р.

Підпис керівника

_____ Руслан ТЕЛЮТА

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2023 р.

Підпис здобувача

_____ Владислав ВІЛЬЧИНСЬКИЙ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота: 89 с.; 20 рис.; 7 табл.; 23 джерел.

Вільчинський В.В. Дослідження поточного стану витрати ресурсу ізоляції силового кабелю в процесі його експлуатації. – Рукопис.

Ціллю даної кваліфікаційної роботи є підвищення надійності силових кабелів за допомогою методу визначення витрати ресурсу ізоляції, шляхом удосконалення математичних моделей діагностування при вивченні їхніх експлуатаційних режимів роботи.

У роботі було оцінено стан проблеми експлуатаційної надійності силових кабелів у реальних умовах. Проаналізовано процеси розвитку та визначено основні види пошкоджень які являються конструкційного, технологічного та експлуатаційного характеру. Встановлено, що ізоляційна конструкція кабелю являється найбільш пошкоджуваним її елементом.

Проведено аналітичне дослідження режимів роботи силових кабельних ліній та витрат ресурсу ізоляції силових кабелів під дією експлуатаційних факторів. Отримана закономірність витрати ресурсу ізоляції дозволяє оптимізувати його експлуатаційні режими з позиції ресурсозберігання.

Наслідком аналізу існуючих методів підвищення експлуатаційної надійності силових кабелів є визначення необхідності подальшого розвитку засобів безперервного діагностування експлуатаційних режимів.

Розроблена система діагностування силового кабеля з погляду ресурсозбереження. Викладено методику діагностування витрати ресурсу ізоляції, розроблено математичну модель ресурсозберігаючого режиму роботи силового кабеля та алгоритм його використання.

Ключові слова: силовий кабель, надійність, ресурсозбереження, ізоляція, витрати ресурсу ізоляції, діагностування режимів роботи, математична модель.

ABSTRACT

Qualification work: 89 p.; 20 fig.; 7 tables; 23 sources

Vilchynskiy V.V. Investigation of the current state of power cable insulation life consumption during its operation. - Manuscript.

The purpose of this qualification work is to increase the reliability of power cables using the method of determining the consumption of the insulation resource, by improving the mathematical models of diagnosis when studying their operational modes of operation.

The paper evaluated the state of the problem of operational reliability of power cables in real conditions. The development processes were analyzed and the main types of structural, technological and operational damages were determined. It was established that the insulating structure of the cable is its most damaged element.

An analytical study of power cable lines' operation modes and resource costs of power cable insulation under the influence of operational factors was conducted. The resulting regularity of insulation resource consumption allows to optimize its operating modes from the point of view of resource conservation.

The result of the analysis of the existing methods of increasing the operational reliability of power cables is the determination of the need for further development of tools for continuous diagnostics of operational modes.

A power cable diagnosis system has been developed from the point of view of resource saving. The method of diagnosing the consumption of the insulation resource is described, a mathematical model of the resource-saving mode of operation of the power cable and the algorithm of its use are developed.

Key words: power cable, reliability, resource saving, insulation, insulation resource consumption, diagnostics of operating modes, mathematical model.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕСУРСОЗБЕРІГАННЯ В СИЛОВИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ	13
1.1 Експлуатаційна надійність силового електроустаткування.....	13
1.2 Походження дефектів у силових кабельних лініях.....	15
1.3 Аналіз впливу експлуатаційних дій на розвиток процесів ушкодження силового кабелю.....	19
1.4 Висновки по розділу 1	21
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ПАРАМЕТРИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	22
2.1. Стратегія раннього попередження розвитку процесів ушкодження і зносу ізоляції силових кабелів.....	22
2.2 Методи безперервного діагностування процесів теплового зносу ізоляції силових кабелів впродовж їх експлуатації.....	23
2.3 Аналіз параметрів для визначення стану силового кабелю.....	25
2.3.1 Сила струму як діагностичний параметр.....	25
2.3.2 Температура ізоляції як діагностичний параметр теплового процесу	28
2.3.3 Швидкість теплового зносу ізоляції як діагностичний параметр теплового процесу.....	30
2.4 Висновки по розділу 2	32
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТИ РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО КАБЕЛЮ.....	33
3.1 Закономірності теплового старіння ізоляції кабелів	33
3.2 Теплові перехідні процеси в силовому кабелі.....	37
3.3 Моделювання теплових процесів в силових кабелях.....	39
3.4 Аналіз досліджуваного силового кабелю	47

3.5 Визначення електричних показників силового кабелю	49
3.6 Дослідження впливу форми графіка навантаження силового кабелю на добове теплове зношення ізоляції	51
3.7 Висновки до розділу 3	68
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИЛОВОГО КАБЕЛЮ	69
4.1 Алгоритм діагностування експлуатаційних режимів роботи силового кабелю	69
4.2 Розробка структурної схеми діагностування експлуатаційних режимів роботи силового кабелю	71
4.3 Розробка алгоритму роботи системи діагностування силового кабелю	75
4.4 Висновки до розділу 4	77
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79
ДОДАТКИ	82
ДОДАТОК А. ОХОРОНА ПРАЦІ	81

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП- аналого-цифрового перетворювача

БЖ – блок живлення

ЕЗ – енергозбереження

ЕД – електричний двигун

МК – мікроконтролер

КЛ – кабельна лінія

ПП – пристрій програмування

ПК – персональний комп'ютер

ПР – поточний ремонт

СК – силовий кабель

СКЛ – силові кабельні лінії

РЗ – ресурсозбереження

ТО – технічне обслуговування

х.х. – холостий хід

к.з. – коротке замикання

ккд – коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

Електроенергія на даний час є основою стаціонарних технологічних процесів. Тому результати виробничої діяльності в багатому визначаються станом електрообладнання, поряд з надійністю електропостачання.

Силові високовольтні кабелі в даний момент широко використовуються як електротехнічні пристрої для передачі електричної енергії.

Силовий кабель отримав широке поширення завдяки високій конструкційній надійності. Однак практика вказує на те, що експлуатаційна надійність цих кабелів не повністю відповідає вимогам виробництва через великий відсоток виходу з ладу через специфічні умови експлуатації, які не були враховані при їхньому проектуванні.

Це спричинює незаплановані матеріальні витрати через порушення технологічних процесів, що має відбиття на кількісних і якісних показниках виробництва. Крім того, для відновлення або заміни необхідно витрачати певну кількість матеріалів (мідного чи алюмінієвого проводу, електротехнічної сталі, ізоляційних матеріалів), електроенергії та робочого часу. Таким чином, щорічні витрати на ремонт або заміну кабелів продовжують зростати пропорційно кількості електроспоживачів [1-4].

Причини відмов силових кабелів, згідно з джерелами [1-4], можна класифікувати наступним чином: невідповідність кабеля умовам експлуатації - 35%; недоліки конструкції - 15%; системи експлуатації - 50%, приблизно 70% з яких припадає на несвоєчасне проведення профілактичних і захисних заходів. Іншими словами, основні причини - це недоліки у конструкції, не відповідність умовам експлуатації та недостатній рівень технічного обслуговування.

Під час аварійних режимів роботи електроспоживачів також виникають додаткові втрати активної енергії, що призводять до перегріву кабелів.

Отже, існує виклик, пов'язаний із підвищенням експлуатаційної надійності кабелів. Суть проблеми полягає у тому, що щорічно відмовляють приблизно 8-10% наявного парку силових кабелів. Негативні наслідки включають

незаплановані витрати, пов'язані із раптовою зупинкою технологічних ліній, а також на ремонт кабелів та додаткові втрати активної енергії. Причини цієї проблеми включають низький рівень експлуатації силових кабелів, зокрема недосконалість контролю, діагностування та захисту кабелів.

Шлях розв'язання цієї проблеми полягає у підвищенні рівня експлуатації за допомогою об'єктивного безперервного контролю, діагностування та надійного захисту силових кабелів.

У наявній системі обслуговування та ремонту електроустаткування плановане діагностування виконується для оцінки загального стану кабеля, включаючи контроль загального параметра (зазвичай - опір ізоляції самої обмотки) та візуальний огляд стану кабеля. Позапланове діагностування проводиться під час технічного обслуговування та покладається на визначенні можливої причини несправності силового кабелю, а також в візуальному контролі його стану.

Функціональне діагностування кабеля або лінії проводиться з моменту його введення в експлуатацію і протягом всього періоду його функціонування та експлуатації. Цей процес передбачає безперервний контроль зміни одного чи декількох основних параметрів, які вказують на пошкодження, зношування чи можливий вихід з ладу кабеля. Коли система виявляє ненормальний процес у кабелі, вона автоматично подає сигнал обслуговуючому технічному персоналу для подальшого, більш детального діагностування та вжиття відповідних заходів під час технологічних перерв у роботі. Відключення кабеля відбувається у випадку, коли його подальша експлуатація у такому технічному стані може призвести до різкого погіршення або до виходу з ладу до завершення його експлуатаційного використання.

Переваги застосування діагностування силових кабелів у рамках системи планово-попереджувального ремонту електроустаткування можуть бути сформульовані так: забезпечує визначення найбільш ймовірних несправностей; сприяє скороченню часу на проведення поточного ремонту; підвищує якість виконання технічного обслуговування та поточного ремонту. Можна також

розширити і вдосконалити діагностичні можливості, додавши аналіз додаткових технічних параметрів та використовуючи сучасні методи моніторингу та датчиків для більш ефективного контролю за станом силових кабелів.

Недоліки використання діагностування силових кабелів за системою планово-попереджувального ремонту електроустаткування можна визначити наступним чином: високі витрати часу та ресурсів на проведення діагностики; відсутність повного контролю стану кабелів середньовартісно протягом 1 року; технологія діагностування дозволяє виявляти несправності у вузлах кабелів, проте не надає можливість передбачити, як цей кабель буде працювати у визначеному режимі роботи. Важливо враховувати ці недоліки при розгляді ефективності системи діагностування та плануванні робіт з обслуговування та ремонту.

Для усунення недоліків діагностування силових кабелів можна розглянути наступні шляхи: удосконалення математичного апарату оцінки процесу зношування ізоляції кабелів (використання результатів діагностування не лише як прямих діагностичних показників для безпосереднього порівняння, але й для розрахунку непрямих показників; розробка нових методів та алгоритмів, які дозволяють більш точно визначати стан ізоляції кабелів. Розробка нових рішень для керування режимами роботи силових кабелів (впровадження систем автоматичного керування, що базуються за результатами діагностики). Ці заходи спрямовані на покращення точності та ефективності діагностування силових кабелів та оптимізацію їхнього управління для підвищення надійності та тривалості експлуатації.

Метою роботи є підвищення надійності силових кабелів за допомогою впровадження методу визначення витрати ресурсу ізоляції. Це досягається шляхом удосконалення математичних моделей діагностування під час дослідження їхніх експлуатаційних режимів.

Завдання роботи включає наступні етапи:

Проаналізувати вплив експлуатаційних факторів (впливу різних факторів експлуатації на розвиток процесів пошкоджень силових кабелів).

Аналіз методів безперервного діагностування і прогнозування (розгляд та аналіз існуючих методів безперервного діагностування і прогнозування технічного стану силових кабелів під час їх експлуатації).

Розгляд теплового перехідного процесу (аналіз теплових перехідних процесів силового кабелю та їх вплив на його стан та ресурс ізоляції).

Теоретичне дослідження витрати ресурсу ізоляції (проведення теоретичних досліджень, спрямованих на визначення витрат ресурсу ізоляції силового кабелю під впливом експлуатаційних факторів).

Обґрунтування структури пристрою діагностування (розробка та обґрунтування структури пристрою для діагностування експлуатаційних режимів роботи силового кабелю).

Об'єктом дослідження є процеси, що відбуваються в силовому кабелі під впливом експлуатаційних факторів.

Предметом дослідження є закономірності витрати ресурсу ізоляції силового кабелю в залежності від параметрів експлуатаційних факторів.

Практична цінність отриманих результатів полягає в рекомендаціях по розробці пристрою для функціонального діагностування режимів роботи силового кабелю. Впровадження цього пристрою дозволяє значно підвищити експлуатаційну надійність силових кабелів.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕСУРСОЗБЕРІГАННЯ В СИЛОВИХ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЯХ

1.1 Експлуатаційна надійність силового електроустаткування

Надійність силового кабелю суттєво визначається надійністю проводу, яка, у свою чергу, залежить від стану ізоляції. Ізоляція працює в складних та часто дуже несприятливих умовах. Під час тривалої експлуатації силове електроустаткування піддається різноманітним експлуатаційним впливам.

Температура довкілля є основним фактором, що впливає на силове електроустаткування, яке працює в широкому діапазоні коливань як щоденних, так і сезонних температур. Більшість силового обладнання піддаються впливу температури повітря і сонячної радіації. Влітку можуть працювати при високих температурах (до $+45\div 50^{\circ}\text{C}$), а зимовими місяцями можуть піддаватися низьким температурам (до $-22\div 27^{\circ}\text{C}$).

Перевантаження електрообладнання часто виникає через дефекти у робочих машинах і механізмах. Наприклад, відсутність автоматизації та контролю навантаження може призвести до перевантаження. Деякі механізми, які використовуються під навантаженням взимку, можуть застоюватися, а рухомі частини робочих машин часто мерзнуть, збільшуючи масу через прилипання і, відповідно, збільшуючи сили тертя і крутний момент. Це може призвести до перевантажень електрообладнання й ускладнених запусків, що значною мірою буде впливати на ста силового кабелю.

Особливо небезпечним для ізоляції силового електроустаткування є вплив надмірних струмів. Затяжні запуски, коливання напруги, зокрема при зниженні, неповних фазах, застрягання робочих машин можуть призвести до виникнення надмірних струмів. Силові трансформатори також вразливі до впливу струмів короткого замикання в електромережах, а також пускових струмів електродвигунів. Також виявляється нерівномірне розподілення навантаження за

фазами, що супроводжується перекосами напруги. Це також призводить до теплових перевантажень електрообладнання, та силового кабелю зокрема. Часто під час експлуатації кабелів виникає погіршення умов охолодження через забруднення поверхонь ізоляції продуктами обробки, відсутність очисних заходів.

Досить часто силові кабелі піддаються впливу комутаційних перенапруг, які можуть бути 5-10 кратно вищі за номінальну напругу, величина цих перенапруг є випадковою, і залежить від числа комутаційних операцій, які, у свою чергу, пропорційні часу роботи електрообладнання. Також слід звернути на вібрацію, яка є руйнівним чинником для ізоляційних конструкцій кабелю.

Волога та хімічно активні середовища негативно впливають на електричні машини під час експлуатації. Проникнення вологи в ізоляцію відбувається переважно під час їх неробочого періоду, особливо інтенсивно під час охолодження. Мала в'язкість та інші властивості води сприяють її проникненню в дрібні пори, гідролітичному руйнуванню ізоляційних матеріалів, а також розщепленню полімерних ланцюгів. Це призводить до зниження опору ізоляції та її електричної міцності, створюючи передумови для витoku струму.

Хімічно активні речовини, такі як аміак, вуглекислий газ та сірководень, завдають шкідливого впливу на ізоляційну конструкцію силового кабелю. Загазованість місця розташування кабелю цими речовинами призводить до значно швидшого псування ізоляції.

Процеси пришвидшення старіння ізоляції, викликані різними експлуатаційними впливами, з часом активізуються та прогресують. Руйнування ізоляції відбувається плавно, головну роль відіграють теплові процеси старіння. Навіть при невеликих температурах, коли термоокислювальна деградація обмежена, відбувається усихання, випаровування летючих компонентів, зниження еластичності ізоляції, збільшення крихкості. Це сприяє розвитку механічного старіння, появі тріщин і інших дефектів, розшаруванню та розслабленню ізоляції, що створює умови для виникнення іонізаційних явищ. Руйнування ізоляції відбувається нерівномірно і завершується пробоем в

найбільш вразливого місці. Волога і агресивні середовища сприяють прискоренню і активізації процесів старіння [3].

Таким чином, кабельні лінії піддаються впливу експлуатаційних факторів, таких як графік навантаження, температура навколишнього середовища, перевантаження викликане роботою силового електрообладнання, тривалості пускових режимів, асиметрія та відхилення напруги, зміни умов охолодження через засмічення поверхонь кабеля, комутаційні перенапруги електромережі, вологість та агресивність навколишнього середовища.

Експлуатаційні фактори, що впливають на електричні машини водночас впливають і на силові кабелі й проводи, що загалом повинно бути розглянуто спільно. Силові кабелі й проводи піддаються впливам графіку навантаження тої чи іншої електроустановки, температури навколишнього середовища, перевантажень діючого електрообладнання, пускових струмів ЕД і к.з струмів.

1.2 Походження дефектів у силових кабельних лініях

Дефекти в силових кабельних лініях можуть виникати на різних етапах: під час виготовлення, монтажу і експлуатації. Прогнозування кількості можливих дефектів у кабельній лінії важке через залежність цього показника від довжини лінії, якості кабеля та дотримання вимог, що ставляться до прокладання та монтажу лінії.

Профілактичні високовольтні випробування дозволяють виявляти ослаблення ізоляції на ранніх етапах розвитку дефекту, що унеможливорює вихід кабеля з ладу. Зміна електричної міцності ізоляції свідчить про появу дефектів, які можуть зменшити ефективність ізоляційного матеріалу. У процесі експлуатації це зменшення міцності може виникати внаслідок різних факторів, таких як механічні, електричні і теплові навантаження, що діють на кабель.

Давайте розглянемо основні причини виникнення дефектів у силових кабелях на різних стадіях. В енергопостачальних організаціях перебувають силові кабелі, випущені різними виробниками. Підприємства, що виготовляють

силові кабелі, здійснюють контроль технологічних операцій на всіх етапах виробництва. Лабораторні випробування продукції дозволяють виявляти дефекти, пов'язані з порушенням технологічних операцій, такі як тріщини або отвори в захисних оболонках, надриви паперових стрічок і т. д. Однак не завжди вдається повністю усунути порушення технологічних режимів. Крім того, неможливо повністю змодельовати процеси, що відбуваються у матеріалах, використовуваних у силових кабелях, в реальних умовах експлуатації. Особливу увагу слід приділити новим матеріалам, застосовуваним у кабелях. Навіть маючи певні переваги порівняно з традиційними матеріалами, вони не завжди сумісні з ними за фізико-хімічними та механічними характеристиками в умовах тривалої експлуатації. У зв'язку з цим виробники видавати гарантійні зобов'язання на певний строк, протягом якого гарантується виконання всіх вимог до кабеля, за умови дотримання споживачем правил транспортування, зберігання, прокладки, монтажу та експлуатації кабеля.

Більшість дефектів, що виявляються під час експлуатації, зазвичай виникають під час монтажу кабельних ліній. Причини цих дефектів можуть мати різний характер.

Зазвичай не рекомендується проводити прокладку силових кабелів, незалежно від їхньої марки, місця і способу прокладки, при негативних температурах навколишнього середовища.

Поява мікротріщин може також статися при виникненні механічних напружень, що виникають при витяганні кабеля під час прокладки. Рекомендується контролювати сили витягання за допомогою динамометра або іншого вимірювального пристрою, оскільки допустимі значення витягання можуть відрізнятися для струмоведучих жил, оболонок та ізоляції.

Порушення ізоляції кабеля під час монтажу може також виникнути при недотриманні кратності кривої вигину кабеля в порівнянні з діаметром жилки. Кратність повинна бути не менше 10 діаметрів жилки для кабелів напругою від 1 до 10 кВ з пластмасовою та паперовою ізоляцією.

Кінцеві заправлення та муфти є слабкими місцями в кабельних лініях. Невідповідність вимог монтажних операцій може не лише призвести до виходу їх з ладу, але й спричинити неполадки в усій кабельній лінії. Порушення, навіть здавалося б незначні на перший погляд, можуть мати серйозні наслідки. Різні фактори впливають на якість виготовлення сполучних і кінцевих муфт, такі як якість і стан матеріалів, що входять до складу муфти, параметри навколишнього середовища під час проведення монтажних робіт, а також кваліфікація персоналу, який виконує монтаж муфти і т.д. У процесі монтажу сполучних і кінцевих муфт можуть виникати наступні характерні дефекти: пошкодження ізоляції і дротів, неповне заливання корпусу, не пропаяні шийки муфт і інші.

Під час експлуатації в кабельних лініях можуть траплятися різні аварійні ситуації, кожна з яких має свої специфічні відмітні ознаки.

Виникнення пошкоджень в силових кабелях може мати різні причини. Загалом, період експлуатації силового кабеля можна умовно розділити на кілька етапів [4].

На початковому етапі основними причинами виникнення аварійних ситуацій є заводські дефекти або несправності, які виникають в процесі монтажу. З низькою електричною міцністю, такі проблеми, як правило, виявляються протягом перших двох-трьох років після введення лінії в експлуатацію.

На другому, експлуатаційному етапі аварійні ситуації в основному мають випадковий характер і не пов'язані з процесами старіння виробу.

Серед очевидних причин, таких як механічні ушкодження будівельними механізмами, слід виділити приховані причини, які виникають внаслідок впливу декількох факторів. Наприклад, до таких можна віднести невеликі механічні ушкодження захисних оболонок або корозійні процеси, що можуть порушити герметичність і сприяти проникненню вологи в ізоляцію. Певна кількість таких дефектів може бути виявлена під час проведення випробувань кабельних ліній за допомогою підвищення напруги.

Муфти, які використовуються для з'єднання кабелів, можуть стати слабким місцем в системі. Під впливом механічних розтяжних зусиль, спричинених рухом ґрунту, може виникнути ризик обриву струмоведучих жил.

Під час коротких замикань існує ризик перегорання струмоведучих жил або місць пайки в сполучних гільзах.

Тривалість другого етапу залежить від якості виготовлення кабеля та умов його експлуатації. Зрозуміло, що головним завданням обслуговуючого персоналу є максимальне продовження терміну служби силового кабеля.

Завершальний, третій період відзначається початком інтенсифікації процесів поступового старіння ізоляції та зростанням умов виникнення критичних та аварійних ситуацій. Що призводить до виникнення питання про економічну доцільність експлуатації даної кабельної лінії.

Вплив електричного поля на процес старіння ізоляції є також з причин виникнення дефектів у силових кабелях. Газові включення в ізоляції нового силового кабеля можуть представляти собою порожнечі, які не заповнені просочувальною речовиною. Ці порожнечі можуть виникнути в процесі виробництва або бути результатом впливу різних факторів на ізоляційний матеріал. Наявність газових включень може впливати на електричні характеристики кабеля та його тривалість служби, оскільки під впливом електричного поля ці порожнечі можуть піддається іонізації, що сприяє ерозії ізоляції. Важливо враховувати цей аспект при контролі і обслуговуванні силових кабелів.

Механічні навантаження, породжені електродинамічними процесами при різких змінах струму, таких як наскрізні струми короткого замикання, можуть спричиняти інтенсивне старіння ізоляції силового кабеля. Так, механічні властивості міцності ізоляції можуть змінюватися залежно від температури. Так, межа механічної міцності ізоляції знижується при нагріванні. Великі деформації супроводжуються виникненням необоротних структурних змін у вигляді тріщин, розривів та розшарувань, які розсіяні у всьому об'ємі ізоляції. Під впливом змінного теплового потоку та електродинамічних зусиль, неоднорідність у

ізоляції посилюється, оскільки мікротріщини, наприклад, можуть розповсюджуватися углиб ізоляції.

Різні види пошкоджень силових кабелів призводять до різних фізичних процесів у ізоляції. Швидкість розвитку цих процесів залежить від багатьох факторів, які не завжди можна повністю врахувати при проектуванні лінії. Для виявлення наявності дефектів у силовому кабелі використовуються профілактичні випробування.

1.3 Аналіз впливу експлуатаційних дій на розвиток процесів ушкодження силового кабелю.

На підставі наданого матеріалу можна уявити механізм розвитку процесів пошкодження ізоляції силових кабелів і дротів (див. Рисунок 1). Тут збільшення температури оточуючого середовища, перевантаження струмом, пускові режими електродвигунів та короткі замикання в живучих мережах також можуть призвести до нагрівання ізоляції. Це в свою чергу призводить до прискореного теплового зносу та зменшення механічної міцності. Технологічні дефекти під впливом теплового зносу можуть призвести до локальних пошкоджень ізоляції. Загальне зниження механічної міцності під впливом електродинамічних сил, викликаних струмами короткого замикання, може спричинити локальні дефекти ізоляції. Ці дефекти можуть викликати замикання на корпус або міжфазні замикання, призводячи до відмови силових кабелів або проводів.

З метою визначення діагностичних параметрів і обґрунтування критеріїв оцінки інтенсивності ушкодження ізоляції силових кабелів під час експлуатації проведений аналіз впливу експлуатаційних дій на розвиток цих процесів [2].

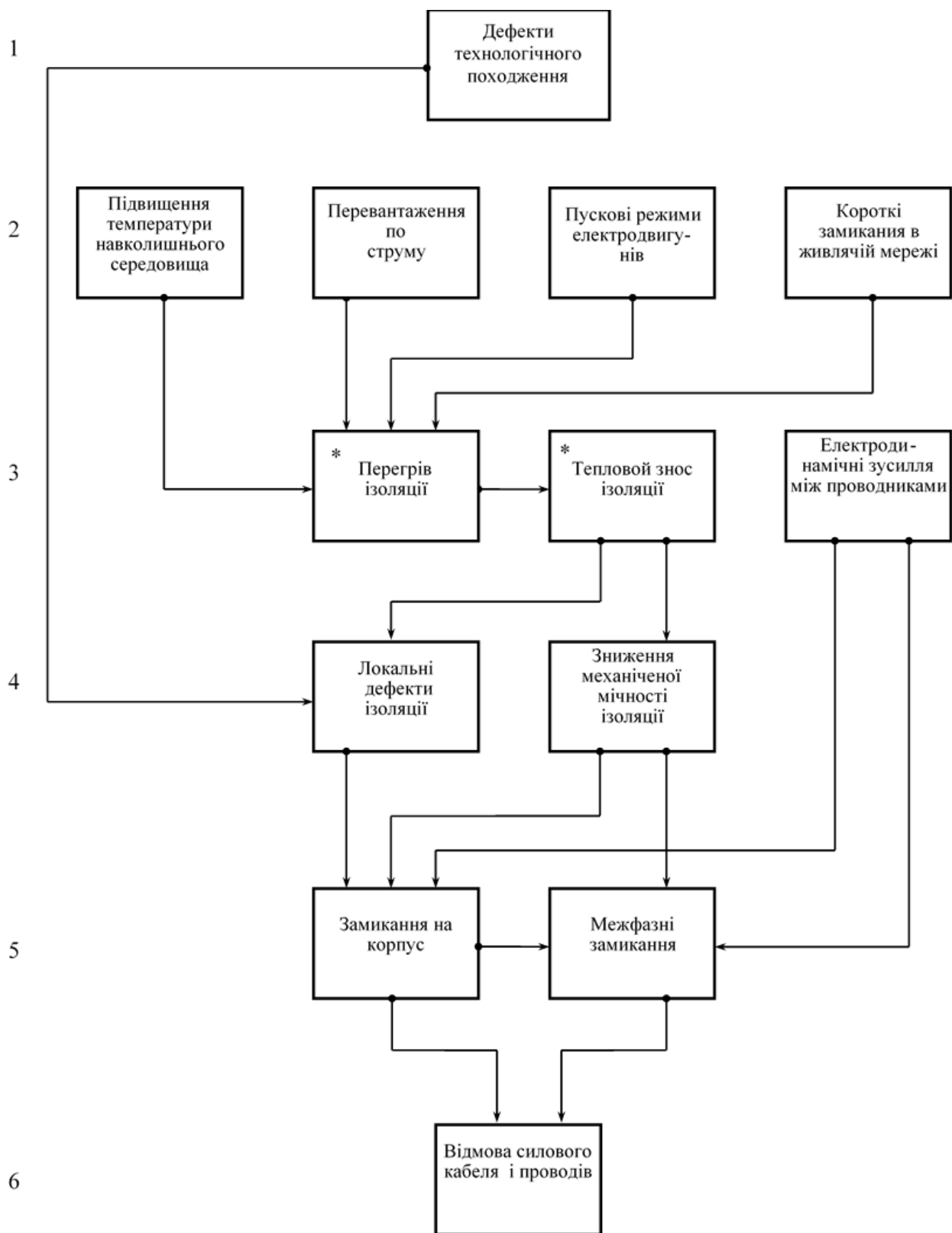


Рисунок 1 - Детальна схема розвитку пошкоджень ізоляції кабелю: 1 – дефекти технологічні; 2 – дефекти експлуатаційного характеру; 3, 4, 5, 6 – наступні послідовні стадії розвитку дефектів ізоляції.

1.4 Висновки по розділу 1.

1. Втрата ресурсу ізоляції силового кабеля виникає внаслідок режимних чинників, що призводять до перегрівання ізоляції, і кліматичних (вологість, агресивність), що ініціюють фізико-хімічні зміни в структурі ізоляції, що призводить до її руйнування. Тому дослідження втрати ресурсу ізоляції рекомендується поділити на режимний і кліматичний.

2. Режими роботи силових кабелів під впливом експлуатаційних дій досліджені недостатньо. Основні види експлуатаційних впливів на силові кабелі включають перевантаження по струму та температуру довкілля, де вони розташовані. Відсутні комплексні дослідження витрати ресурсу ізоляції силових кабелів.

3. При дослідженні витрати ресурсу ізоляції силового кабелю важливе місце займають дослідження теплових перехідних процесів. Зазвичай, у таких дослідженнях види силового електроустаткування розглядаються як гомогенні тіла. Однак силові кабелі є гетерогенними тілами, і дослідження їх теплових перехідних процесів є важливим як теоретичним, так і практичним інтересом, включаючи квазістаціонарний стан при циклічному навантаженні.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИ ТА ПАРАМЕТРИ ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1 Стратегія раннього попередження розвитку процесів ушкодження і зносу ізоляції силових кабелів

У сфері технічного обслуговування і ремонту електрообладнання існують загалом три стратегії: обслуговування по необхідності (тільки після втрати працездатності); планово-профілактична (проведення профілактичних заходів за чітко встановленим графіком, незалежно від стану обладнання); планово-діагностична (проведення профілактичних заходів з урахуванням поточного стану обладнання шляхом розподільного по термінам діагностування).

Основою методів безперервного діагностування та прогнозування технічного стану силових електричних кабелів в процесі їх експлуатації є стратегія раннього попередження розвитку процесів зношення та руйнування провідної ізоляції кабелю [2].

Стратегія раннього попередження розвитку процесів руйнування ізоляції кабельної лінії зводиться до безперервного контролю зміни параметрів, що вказують на процеси зносу ізоляції та часткове її пошкодження. Також ця стратегія включає безперервний моніторинг параметрів, які характеризують технічний стан ізоляції на даний момент часу. Вона передбачає своєчасне повідомлення працівників кабельної служби про розвиток ненормальних процесів у КЛ з подальшим проведенням інтенсивнішого діагностування поточного технічного стану, не вимикаючи кабель в ході технологічного процесу і не завдаючи економічних збитків у виробництві.

Кабельну лінію слід відключати лише в разі, якщо продовження її роботи в поточному режимі може призвести до раптового погіршення технічного стану або втрати працездатності до завершення технологічного процесу, а вартість ремонтних робіт з відновлення кабелю перевищить технологічні втрати.

2.2 Методи безперервного діагностування процесів теплового зносу ізоляції силових кабелів впродовж їх експлуатації

Проведені раніше огляд літературних джерел показують, що для безперервного діагностування необхідно включити теплові процеси, що відбуваються у кабелі, надструми, що виникають під час роботи, режими роботи при неоптимальних умовах, а також поточний стан ізоляції кл.

Безперервний моніторинг або діагностика теплових процесів може здійснюватися за допомогою одного із наступних методів: безперервний моніторинг перевищення температури проводу над температурою навколишнього середовища та порівняння цього значення з номінальним; безперервний моніторинг перевищення температури проводу і порівняння її з номінальним значенням; безперервний моніторинг перевищення температури броні над температурою довкілля та температури броні і порівняння цих значень з номінальним; безперервний моніторинг теплового зносу ізоляції та його швидкості і порівняння цих значень з номінальним, з подальшим накопичення підсумкової інформації; моделювання теплових процесів у кабелі за допомогою цифрових моделей.

Діагностування процесів безперервно, які включають надструми, можна проводити одним за рахунок наступних методів: безперервним та постійним контролем імпульсу надструму, порівнянням його із допустимим значенням та обліку отриманої інформації; постійним обліком зносу ізоляції внаслідок комбінованої дії температури обмотки і надструму та обліком отриманої інформації з результатами стану.

Також запропоновані методи безперервного моніторингу та діагностування процесів теплового зносу ізоляції при неоптимальних режимах та поточного стану ізоляції силових кабелів через постійно змінні значення струмів витоку в порівнянні їх допустимих показників [4].

Класифікація методів та параметрів безперервного діагностування стану кабелів представлена на рисунку 2.1.

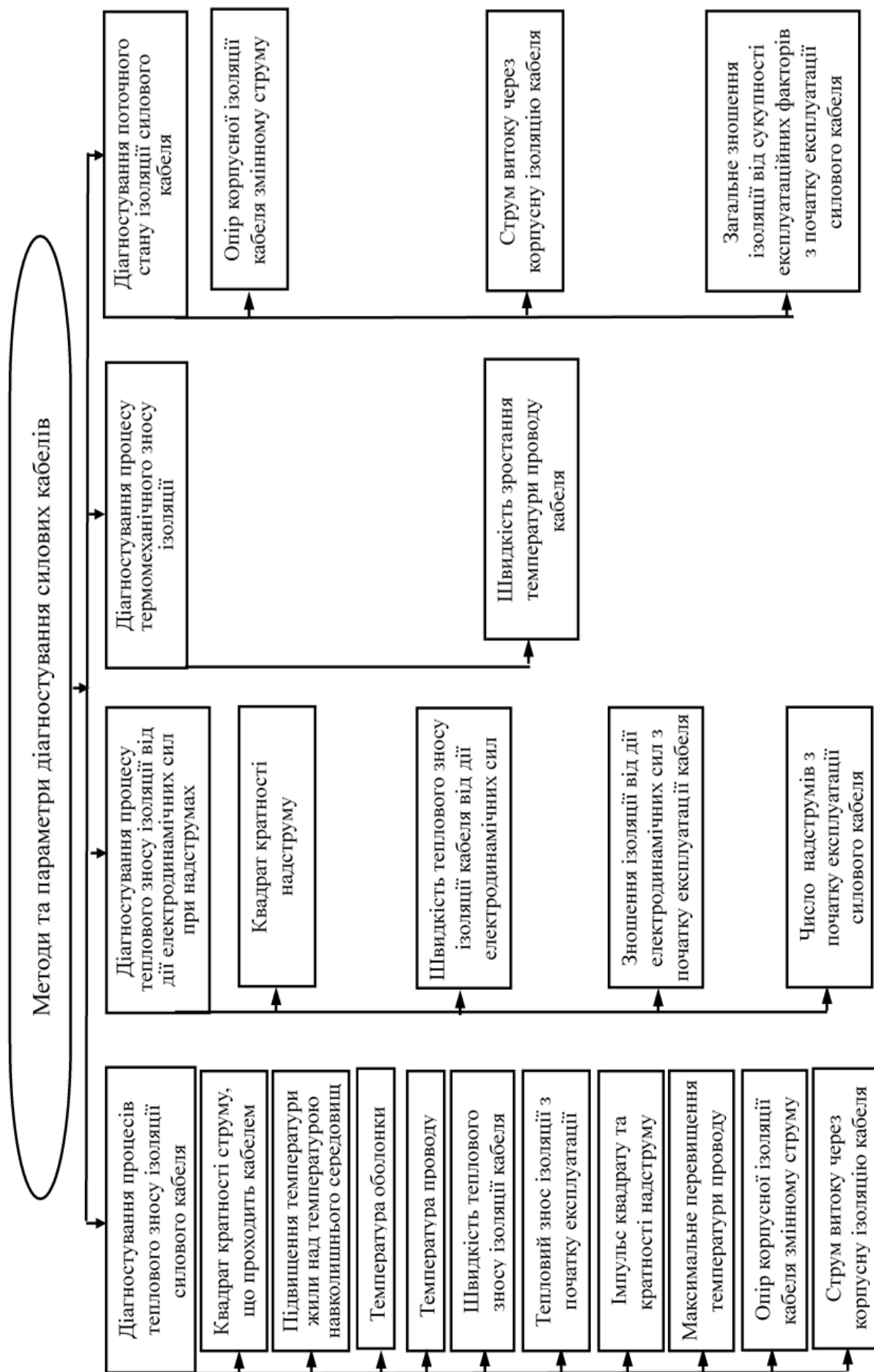


Рисунок 2.1 - Класифікація методів та параметрів безперервного діагностування стану кабелів.

2.3 Аналіз параметрів для визначення стану силового кабелю

Аналізуючи структурну схему розвитку процесів (рисунок 1) витрати ресурсу ізоляції силових кабелів можна стверджувати що одним із ключових параметрів функціонального діагностування є швидкість теплового зносу ізоляції. Контроль за цим параметром дозволяє ефективно оцінити працездатність кабельної лінії в цілому.

У функціональному діагностуванні кабельних ліній використовуються непрямі параметри, такі як перевищення температури проводу, сила струму, напруга зміщення нейтралі, температура броні кабелю. Ці показники є інформаційними для оцінки стану лінії.

2.3.1. Сила струму як діагностичний параметр

Струм, що проходить по кабелю, під час його експлуатації може змінюватися внаслідок завантаження електроспоживачів. Навантаження, яке, як правило, є випадковим через відсутність пристроїв регулювання завантаження, може призводити до випадкових змін в колах керування. Короткочасні збільшення сили струму можуть виникати під час запуску електродвигунів або внаслідок випадкових короткочасних перевантажень. Отже, сила електричного струму може не бути об'єктивним параметром для діагностики працездатності кабелю та як сигнал обслуговуючому персоналу [2].

Проте у випадках, коли надструми перевищують півтора кратне значення, сила струму може стати єдиним об'єктивним діагностичним параметром для кабельної лінії її поточного режиму роботи.

Тому і проводяться дослідження теплових перехідних процесів під час значних перевищень струмів, коли може виникнути необхідність призупинити технологічний процес, щоб уникнути пошкодження як проводів так і їх ізоляції.

З урахуванням швидкоплинності теплових процесів при надструмах, ми можемо прийняти, з достатньою точністю, що вони протікають адіабатично. Таким чином, можемо записати рівняння теплового балансу у такому вигляді:

$$Cd\tau = P_0(1 + \alpha\tau)dt, \quad (2.1)$$

Напишемо рівняння нагнутим чином:

$$T_n \frac{d\tau}{dt} - \tau - \frac{1}{\alpha} = 0, \quad (2.2)$$

Виразивши

$$T_n = \frac{C}{\alpha P_{10}} \quad (2.3)$$

Проводячи вирішення рівняння (2.2), знаходимо поточне значення перевищення температури, при цьому приймаємо початкове перевищення температури за номінальне:

$$\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_n \right) e^{\frac{t}{T_n}} - \frac{1}{\alpha} = 0 \quad (2.4)$$

Проводячи розрахунки беремо похідну перевищення температури за часом. Потім визначаємо швидкість наростання температури:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{1}{T_n} \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_n \right) e^{\frac{t}{T_n}} \quad (2.5)$$

Втрати потужності при температурі довкілля становлять:

$$P_{10} = 3 \cdot r_0 \cdot I^2, \quad (2.6)$$

Підставивши формули (2.3) і (2.6) у вираз (2.4), отримуємо:

$$\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_H \right) e^{\frac{3\alpha r_0 I^2 t}{C}} - \frac{1}{\alpha}. \quad (3.7)$$

Величину, що має вираз $I^2 t$ приймаємо за імпульс квадрата надструму, та опишемо наступним виразом Позначимо її таким чином:

$$\Pi = I^2 t. \quad (3.8)$$

Проводячи заміну (2.7) з врахуванням (2.8)

$$\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_H \right) e^{\frac{3\alpha r_0 \Pi}{C}} - \frac{1}{\alpha}. \quad (2.9)$$

Визначимо прийнятий за критерій нагрівання обмотки при надстрімі

$$K_H = \frac{3\alpha r_0 \Pi}{C}. \quad (2.10)$$

Тоді матимемо вираз

$$\tau = \left(\frac{1}{\alpha} + \tau_H \right) e^{K_H} - \frac{1}{\alpha}. \quad (2.11)$$

Представимо залежність (3.11) графічно через рисунок(рис.2.2) та перепишемо вираз (2.8):

$$\Pi = K_c^2 I_H^2 t \quad (3.12)$$

Залежність τ перевищення поточного значення температури від коефіцієнта завантаження представлено на рисунку 2.2.

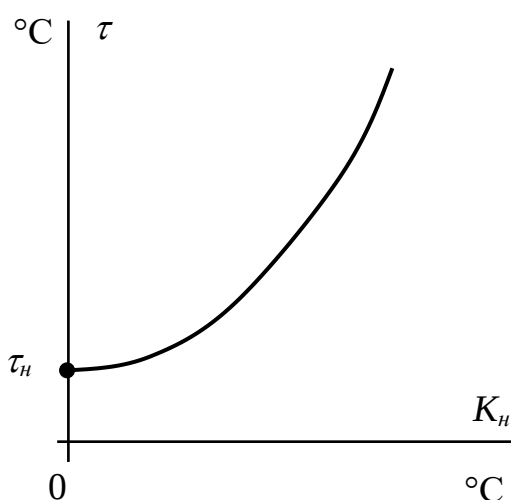


Рисунок 2.2 - Залежність перевищення поточного значення температури від коефіцієнта завантаження

2.3.2 Температура проводу як діагностичний параметр теплового процесу.

Температура обмотки може служити об'єктивним діагностичним параметром теплового процесу, оскільки вона відображає перевищення температури обмотки над температурою довкілля. Проте цей параметр не враховує вплив температури навколишнього середовища, тому не відображає повністю протікання теплового процесу. Для отримання об'єктивніших даних

про поточний стан теплового процесу, корисно враховувати графік зміни температури проводу, оскільки тепловий процес може мати змінний характер, і короточасні підвищення температури не завжди характеризують загальний хід теплового процесу. Графік температурного режиму зображений на рисунку 2.3.

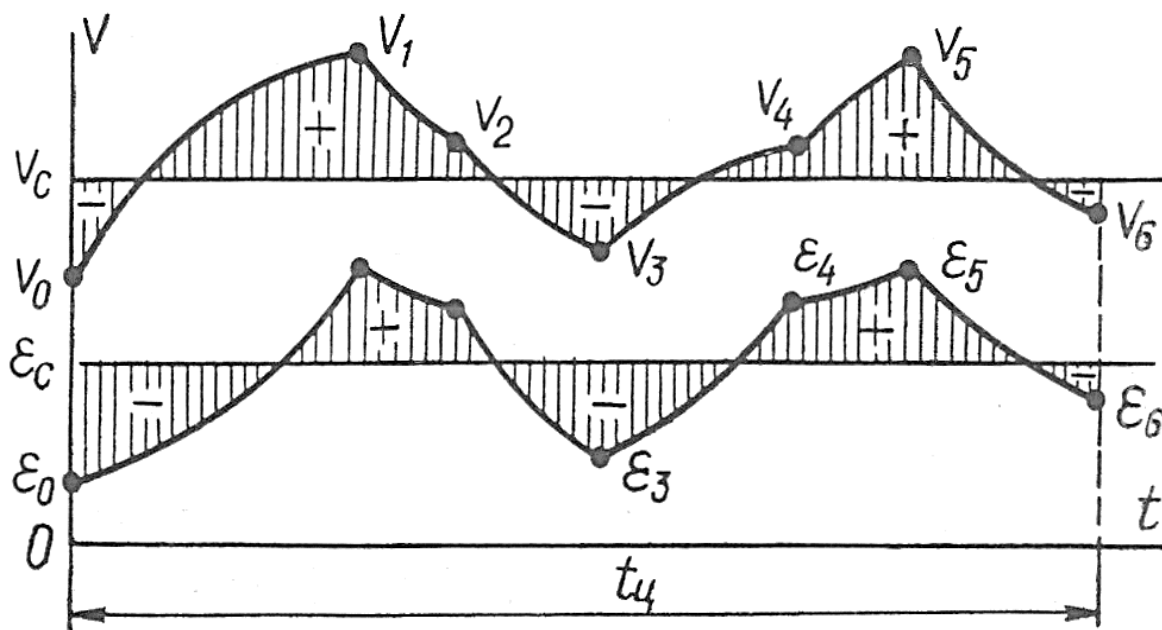


Рисунок. 2.3 - Графік температурного режиму.

В цьому контексті як діагностичний параметр загальної дії теплового процесу протягом певного проміжку часу t_u може бути використане середнє значення температури ϑ_c . Такий параметр може служити основою для функціонального діагностування кабелю [2].

Таким чином, температура проводу може служити параметром функціонального діагностування електродвигуна.

2.3.3 Швидкість теплового зносу ізоляції як діагностичний параметр теплового процесу.

Найоб'єктивнішим, на мою думку, є діагностичний параметр, що характеризує поточний стан теплового процесу кабелю - це швидкість теплового зносу ізоляції ε . Цей параметр взаємодіє з температурою проводу і відображає ступінь зносу ізоляції, що є важливим для функціонального діагностування [2].

$$\varepsilon = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)} \quad (2.13)$$

$$\theta = \vartheta + 273 \quad (2.14)$$

Так само, як і температура, швидкість теплового зношення ізоляції постійно змінюється (рис. 2.3). Тому в якості діагностичного параметра, що відображає загальний напрямок теплового процесу протягом певного проміжку часу t_u , можна вважати середнє значення швидкості теплового зношення ізоляції ε_c . Очевидно, що цей параметр є важливим для функціонального діагностування.

$$\varepsilon_c = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_c}\right)} \quad (3.28)$$

$$\theta_c = \vartheta_c + 273 \quad (3.28)$$

Для оцінки середнього значення теплового зношення ізоляції можна використовувати вираз середньої еквівалентної температури протягом певного проміжку часу ϑ_{ce} , а саме

$$\varepsilon_c = e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta_{ce}}\right)} \quad (3.29)$$

$$\theta_{ce} = \vartheta_{ce} + 273 \quad (3.30)$$

Якщо безперервно враховувати тепловий знос ізоляції кабельної лінії з самого початку її монтажу та використання, наприклад, через $\int \varepsilon dt$, то можна прогнозувати вірогідність його подальшої безвідмовної роботи, порівнюючи цей параметр із базовим ресурсом теплового зносу ізоляції.

Важливою особливістю структурної схеми пристрою безперервного діагностування і прогнозування теплового зносу ізоляції є врахування температури проводу, яка служить ключовим параметром для аналізу та контролю. Рисунок 3.5 ілюструє цю структурну схему, яка дозволяє здійснювати неперервний моніторинг та передбачення процесів теплового зносу ізоляції на основі температурних показників проводу.

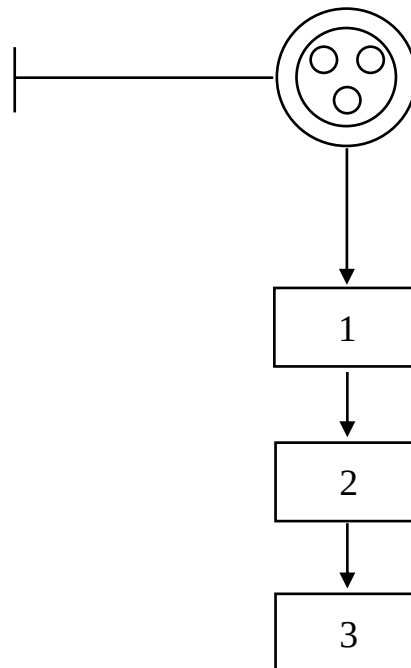


Рисунок 2.4 - Структурна схема пристрою безперервного діагностування і прогнозування процесів теплового зносу ізоляції по температурі обмотки : 1 - перетворювач температури; 2 - функціональний перетворювач; 3 - рахунковий пристрій.

2.4 Висновки по розділу 2.

У теперішній часі обслуговування силових високовольтних кабелів в основному виконується за потребою, а також включає планово-профілактичне і планово-діагностичне обслуговування. Однак такі методи не завжди забезпечують ефективний контроль за поточним розвитком ушкоджень і зносу окремих елементів конструкції кабелю. Зокрема, вони не враховують стрімке розповсюдження ушкоджень та зносу, ускладнюючи вчасне виявлення проблем.

У цьому контексті безперервне діагностування стає ключовим елементом стратегії управління, орієнтованою на попередження процесів ушкодження і зносу ізоляції обмоток. Новітні методи, спрямовані на підвищення експлуатаційної надійності силових високовольтних кабелів, повинні враховувати значну перевантажувальну здатність і враховувати потребу у подальшому розвитку засобів безперервного діагностування для контролю експлуатаційних режимів.

РОЗДІЛ 3.

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВИТРАТИ РЕСУРСУ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ

3.1 Закономірності теплового старіння ізоляції кабелів

У твердих діелектриках при низьких напругах та температурах наскрізний струм діелектрика переважно визначається переміщенням іонів, які вивільнюються під впливом теплового руху.

Енергія яка витрачається при розсіюванні в діелектрику під впливом електричного поля за одиницю часу, отримали назву діелектричних втрат. Але діелектричні втрати при змінному електричному полі, обумовлені як струмом наскрізної провідності так і активною складовою струму абсорбції.

На рисунку 3.1 представлена схема заміщення діелектрика з втратами, а на рисунку 3.2 представлена їй векторна діаграма.

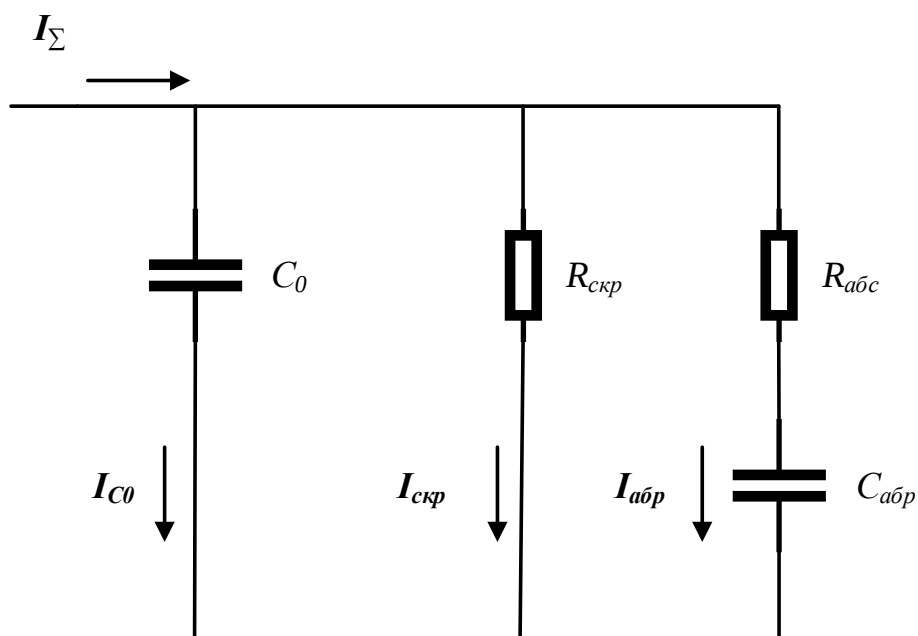


Рисунок 3.1 - Схема заміщення діелектрика.

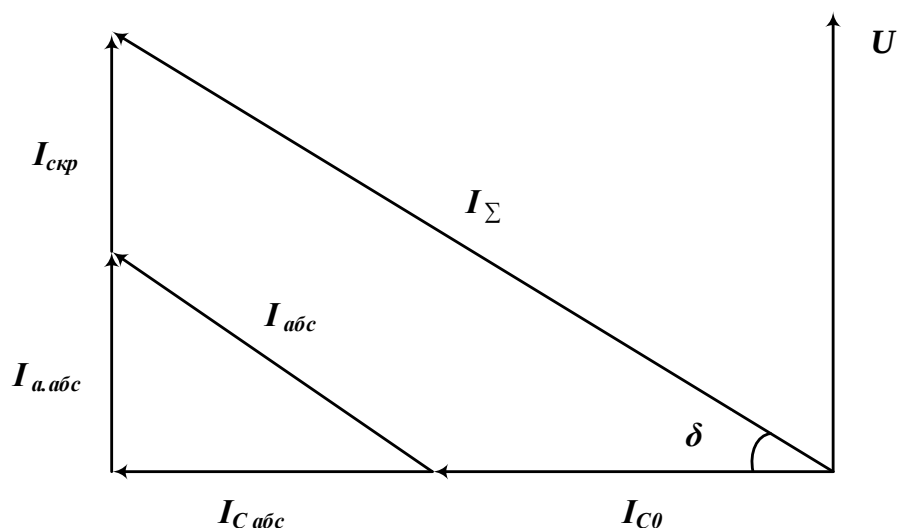


Рисунок 3.2 - Векторна діаграма схема заміщення діелектрика.

З рис. 3.2 діаграми видно, що загальний струм через діелектрик I_{Σ} є геометричною сумою поляризаційного струму I_{C0} , наскрізного струму $I_{скр}$ та абсорбційного струму $I_{абс}$. Діелектричні втрати виникають через активні компоненти струму абсорбції та наскрізного, а саме: $I_{абс} = I_{скр} + I_{а.абс}$.

Отже, кут зсуву фази, виявляється меншим за 90° та на певний кут $\angle \delta$, між струмом через ізоляцію та прикладеною напругою. Цей кут $\angle \delta$ називається кутом діелектричних втрат. Узагальнено, тангенс цього кута ($\tan \delta$) визначається як відношення активної складової до реактивної складової струму, що протікає через діелектрик.

Чим вище кут діелектричних втрат δ , тим менша ефективність та гірша якість його роботи із-за викликаного більшим розсіюванням енергії в діелектрику

Надійність електрообладнання (електродвигунів, силових трансформаторів, кабельних ліній) визначається в основному якістю їх ізоляційних конструкцій, що зазнають впливу різноманітних експлуатаційних та несприятливих факторів. Під час експлуатації ізоляція високовольтного обладнання відчуває одночасний вплив нагрівання, механічних навантажень, сильних електричних полів, а також впливу навколишнього середовища. Під цим

впливом властивості діелектриків змінюються, що призводить до змін їх ізоляційних характеристик кабелю.

Поступове погіршення властивостей діелектриків з часом отримало термін "старіння".

Одним з основних факторів, що впливають на термін служби ізоляції, є тривале нагрівання. В кабельних лініях, джерелами нагрівання є діелектричні втрати в ізоляції, теплові втрати в струмопровідних частинах та температура довкілля.

У певних випадках підвищене (прискорене) зношення ізоляції може бути прийнятне в період великих навантажень за рахунок обмеженого зношення в період недостатнього навантаження.

Волога суттєво впливає на якість ізоляції, сприяючи її деградації та прискорюючи старіння. Заходи для захисту від вологи та контроль за її рівнем є важливими в системах електропостачання.

Руйнування ізоляції стає наслідком нагріву проводу (дротів), механічних ударів, вібрацій, тиску, взаємодії з вологою та хімічно-агресивним середовищем. Зміни у структурі та хімічному складі ізоляції, спричинені цими чинниками, називають старінням, а процес погіршення її властивостей - зносом. Термін служби ізоляції кабельних ліній визначається різними факторами, і одним із ключових є теплове старіння. При аналізі робочих режимів важливими стають методи розрахунку швидкості теплового старіння і визначення (залишкового) строку служби ізоляції [6].

Найперші аналітичні вирази були сформовані правилом «8°» (восьми градусів), відповідно до якого кожних вісім градусів підвищення температури ізоляції проводу призводить до скорочення строку її служби вдвічі [7].

$$D = D_0 \cdot e^{-0,0866 \cdot \Delta T} \quad (3.1)$$

де D_0 – період служби ізоляції, год;

ϑ - поточна температура ізоляції, °C.

В подальшому, були проведені розрахунки та знайдений вираз залежності швидкості хімічних реакцій (наприклад проходять в кабельній лінії) від температури

$$K = Ae^{-\frac{E_a}{R\theta}}, \quad (3.2)$$

де A – коефіцієнт постійного значення.

E_a – надлишкова енергія активації молекули необхідної для хімічної взаємодії;

R – газова постійна, $\frac{\text{Дж}}{\text{град} \cdot \text{моль}}$ 8,317 ;
 θ – температура (абсолютна), К.

Якщо виразити термін служби ізоляції (наприклад для кабелю) через D , то отримаємо аналітичний вираз:

$$D = e^{\frac{E_a}{R\theta} - G}, \quad (3.3)$$

З врахуванням відомостей про базовий термін (ресурс) служби ізоляції D_n кабельної лінії, при номінально встановленій температурі θ_n , можемо встановити поточний термін служби ізоляції D , з врахуванням зміни даних по температурі θ ,

$$D = D_n e^{B\left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta}\right)}, \quad (3.4)$$

Враховуючи аналітичний вираз (3.4) визначимо значення теплової складової швидкості зношення ізоляційної конструкції кабельної лінії при відомій температурі D , год:

$$\varepsilon = \frac{D_n}{D}, \quad (3.5)$$

З врахуванням формули 3.4 та використавши термін служби ізоляції (D) при температурі θ формула 3.5, отримаємо наступний аналітичний вираз:

$$\varepsilon = e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\theta} \right)}. \quad (3.6)$$

3.2 Теплові перехідні процеси в силовому кабелі

Проведемо аналіз нагріву кабелю при симетричному навантаженні та сталій температурі навколишнього середовища. Теплоємність температури навколишнього середовища приймемо як нескінченність. На рис. 3.3 зображена тепла схема заміщення кабелю на три жили [2,15].

Кожна жила кабелю має власну теплоємність C . Дроти пов'язані між собою тепловою провідністю $L_{ж}$, а з навколишнім середовищем — тепловою провідністю L_c . При симетричному навантаженні, як для розгляду нашого випадку так і для несиметричного, у кожній дротині кабелю виникають втрати активної потужності P . При припущенні незалежності від температури, теплової провідності і теплоємності.

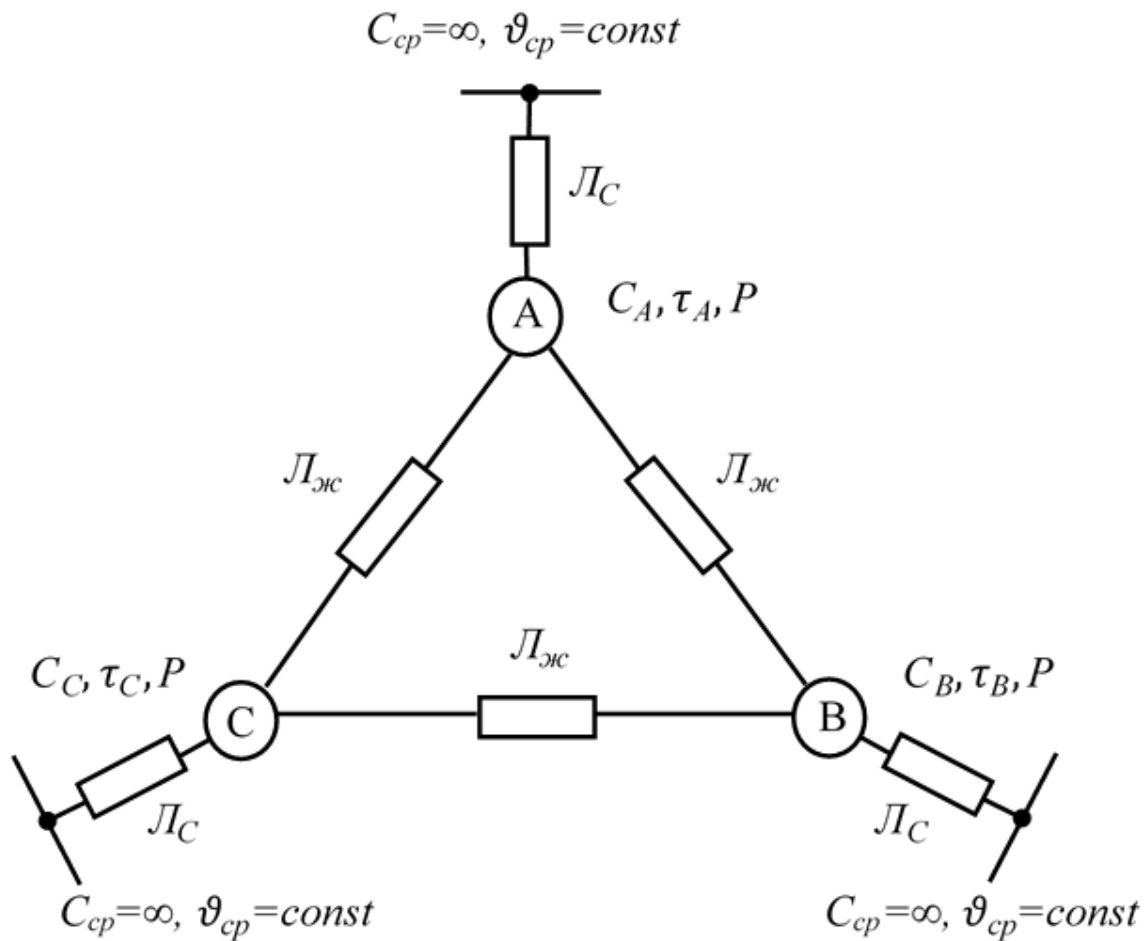


Рисунок 3.3 - Теплова схема заміщення кабелю.

Враховуючи, що кабель трьохфазний, на прикладі однієї із фаз складемо диференціальне рівняння теплового балансу:

$$\begin{aligned}
 r_0 I^2 (1 - \alpha \tau_A) dt = \\
 = C \tau_A d\tau_A + L_{\text{ж}} (\tau_A - \tau_B) dt + L_{\text{ж}} (\tau_A - \tau_C) dt + L_C \tau_A dt,
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

де α - температурний коефіцієнт опору проводу;

τ_A, τ_B, τ_C - перевищення температури жил проводу над температурою довкілля;

Проводячи перетворення, та враховуючи, що теплоємності C кожної із фаз при симетричному навантаженні та перевищення температури жил проводу

над температурою довкілля τ , рівні між собою то рівняння (3.7) перепишемо у виді:

$$\frac{C}{\mathcal{L}_C - r_0 \alpha I^2} \frac{d\tau}{dt} + \tau = \frac{r_0 I^2}{\mathcal{L}_C - r_0 \alpha I^2}, \quad (3.8)$$

Вирішення диференціального рівняння (3.8) має формулу:

$$\tau = \tau_y \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \tau_{нач} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (3.9)$$

Стале перевищення температури матиме вираз

$$\tau_y = \frac{\kappa^2 \tau_n}{1 - \alpha \tau_n (\kappa^2 - 1)}, \quad (3.10)$$

Еквівалентна постійна часу нагріву силового кабеля:

$$T = \frac{C \tau_n}{r_0 I_n^2 (1 - \alpha \tau_n (\kappa^2 - 1))} \quad (3.11)$$

3.3 Моделювання теплових процесів в силових кабелях

В процесі експлуатації силового кабелю та роботи його під навантаженням, а саме проходження електричного струму по дротам, відбувається втрата активної потужності через його нагрівання. При інтенсивному нагріванні проводу, а особливо до максимально допустимих значень, відбувається не зворотній процес теплового зношення ізоляції, що виражається у його старінні. Цей процес протікає незалежним чином, що вимагає постійного моніторингу теплових процесів. Нагрівання кабелю не відбувається рівномірно у кожній точці, але встановлено, що поверхня дроту

буде найбільш нагріта точка ізоляційної конструкції. Її вимірювання температури проводити безпосереднього досить складно, тому значення її отримують розрахунково аналітичним шляхом.

Останнім часом із стрімким розвитком комп'ютерно прикладних програм, розроблених для моделювання різноманітних технологічних процесів, то одним із основних методів дослідження кабелів стає моделювання його теплових процесів.

Моделювання в науковому контексті визначається як апроксимація чи заміщення об'єкта дослідження іншим об'єктом з метою отримання інформації про його ключові властивості шляхом проведення експериментів з моделлю. Модель є абстракцією, що узагальнює та відтворює важливі аспекти оригінального об'єкта, і використовується для пояснення, передбачення та розуміння його поведінки в рамках наукового дослідження.

Моделювання теплових процесів є ключовим методом дослідження силових кабелів у сучасній науці. Цей підхід включає створення концептуальної моделі об'єкта дослідження, формалізацію цієї моделі та перетворення її в комп'ютерну або математичну форму. Після цього проводиться перевірка адекватності моделі та подальше дослідження отриманих результатів за допомогою чисельних або аналітичних методів з використанням комп'ютерних прикладних програм.

Використання методів моделювання надає можливість визначити більш точні дані про стан і характеристики кабелю та теплових процесів, що в них виникають, порівняно з безпосереднім їх вивченням. Використання цих методів дозволяє ефективно використовувати час і кошти, а також уникнути обмежень, які можуть виникнути при застосуванні інших методів дослідження через їхні високі фінансові витрати, тривалі у часі, електронебезпечні, відсутність необхідного обладнання.

Отже, якщо об'єкт дослідження вже досить вивчений і можна мати теоретичні уявлення про його властивості, а також доступ до літературних даних, то доцільно використовувати метод побудови математичної моделі. Цей

метод дозволяє формалізувати взаємозв'язки між різними параметрами об'єкта і розробити математичні рівняння, які відображають його поведінку.

Побудова математичної моделі може включати в себе використання різних математичних методів, таких як диференціальні рівняння, інтегральні рівняння, системи лінійних або нелінійних рівнянь тощо. Крім того, можна враховувати різні параметри, які впливають на об'єкт, і адаптувати модель до конкретних умов дослідження. Такий підхід дозволяє проводити різноманітні числові експерименти, визначати вплив різних факторів і прогнозувати поведінку об'єкта в різних умовах.

Так, в сучасних умовах методи математичного моделювання є невід'ємною частиною дослідження силових кабелів та процесів, які в них виникають. Зокрема, застосування комп'ютерних технологій дозволяє ефективно створювати та аналізувати складні математичні моделі, враховуючи різноманітні фактори, що впливають на систему.

Фахівці в галузі енергетики та комп'ютерних технологій повинні мати відповідні знання і навички для успішного моделювання теплових процесів у силових кабелях. Це включає в себе розуміння фізичних принципів, що лежать в основі цих процесів, а також вміння використовувати математичні інструменти та програмні засоби для побудови та аналізу моделей. Такий підхід дозволяє не лише краще розуміти поведінку силових кабелів, але і ефективно вирішувати завдання їх проектування, експлуатації та підтримки.

У даному випадку, функціонування елементів системи представлено через конкретні функціональні взаємозв'язки, що можуть бути виражені як алгебраїчні, диференціальні, інтегро-диференціальні або скінченно-різницеві рівняння. Також можуть використовуватися логічні мови для опису різних аспектів функціонування системи.

Математична модель реального теплового процесу охоплює сукупність виразів, таких як формули, рівняння, нерівності, логічні умови, оператори та інше. Ці вирази визначають характеристики станів системи, залежно від параметрів, зовнішніх впливів, початкових умов та часу.

Математичні моделі є важливим інструментом для аналізу, прогнозування та оптимізації функціонування теплових процесів у системах, що дозволяє інженерам та дослідникам розв'язувати завдання з проектування, управління та вдосконалення теплових систем [8].

Важливим аспектом процесу моделювання є не лише побудова самої моделі, а й її використання для вивчення та аналізу реального об'єкта. Модель служить інструментом для дослідження та отримання відомостей про реальний об'єкт, а також може піддаватись вдосконаленню протягом процесу дослідження. Процес моделювання є методом пізнання навколишнього світу, де модель використовується для аналізу, прогнозування та оптимізації параметрів реального об'єкта. Постійне удосконалення моделі на основі нових даних і результатів спостережень дозволяє отримувати більш точні та корисні відомості. Такий підхід відображає важливість взаємодії між моделлю та реальним об'єктом як частину процесу дослідження та розвитку наукових та технічних знань.

В тепловому моделюванні дотримуються принципу теорії подібності, що визначає, що абсолютна подібність можлива лише при повній ідентичності об'єктів [9]. Однак, оскільки абсолютна подібність рідко досягається, зазвичай домагаються того, щоб модель достатньо точно відображала обрані аспекти функціонування об'єкта. У процесі теплового моделювання створюють модель, яка, хоч і не абсолютно подібна до реального об'єкта, але придатна для вивчення та аналізу його теплових процесів. Мета полягає у досягненні достатньої схожості для забезпечення корисності та ефективності моделювання. Використовуючи теорію подібності, дослідники стежать за тим, щоб модель адекватно відображала теплові аспекти реального об'єкта, дозволяючи здійснювати дослідження та отримувати практичні результати.

Для аналізу нестационарних теплових процесів широко застосовують спрощені термічні моделі. Ці моделі розглядають силові кабелі як однорідне тіло з нульовим внутрішнім опором. В рамках таких моделей припускається, що кабель є однорідним матеріалом, а його внутрішній опір є мінімальним. Це

дозволяє спростити розрахунки і полегшити аналіз теплових процесів у кабелі. Такий підхід дозволяє отримувати швидкі та ефективні результати для загального розуміння теплових явищ у силових кабелях. Однак важливо зауважити, що ці моделі є спрощенням реальних умов, і їхні результати можуть бути менш точними в окремих сценаріях.

На рисунку 3.4 представлений одножильний кабель. Для розрахунку спрощеної матмоделі як системи однорідних тіл.

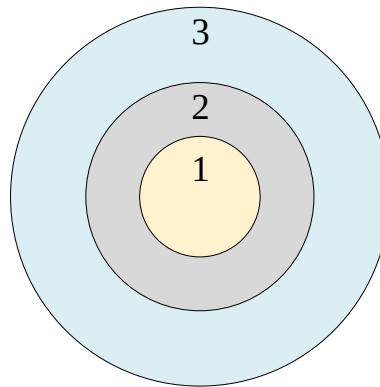


Рисунок 3.4 - Конструкція одножильного кабелю.

На рисунку 3.5 представлена структурна схема теплових процесів, спрощеної моделі одножильного кабелю як системи теплових однорідних тіл.

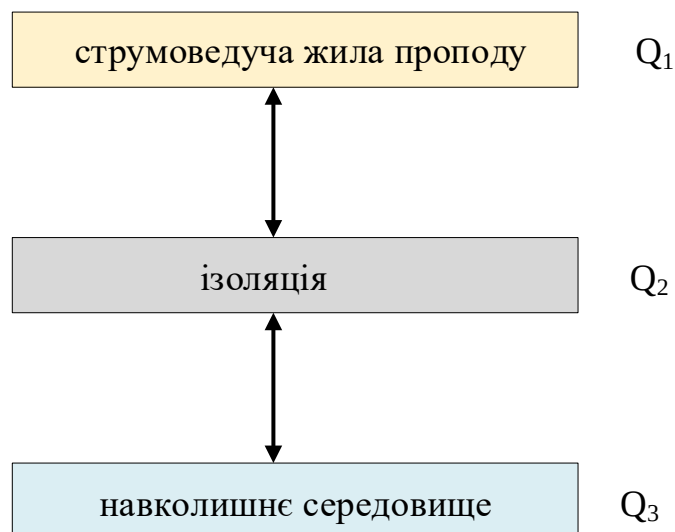


Рисунок 3.5 - Структурна схема теплових процесів.

На рисунку 3.5 позначення Q_1 , Q_2 , Q_3 означають температуру приведених тіл, °C.

Приведемо диференціальне рівняння залежності струмом $I(t)$ від температур жили провідника $\theta(t)$ [10]:

$$I^2(t)r_o[\theta(t)]dt = m_o c d[\theta(t) - \theta_{н.с}(t)] + \kappa_{m.n} S_o [\theta(t) - \theta_{н.с}(t)] dt, \quad (3.12)$$

де m_o - маса провідника;

c - питома теплоємність матеріалу жили провідника;

$\kappa_{m.n}$ - коефіцієнт теплопередачі;

S_o - площі поверхні жили провідника;

$\theta_{н.с}(t)$ - температура навколишнього середовища;

$d[\theta(t) - \theta_{н.с}(t)]$ - похідна перегріву жили провідника.

Кінцеву температуру θ_i i -го інтервалу часу за умови $\theta(0) = \theta_{i-1}$, де $i = 1, 2, \dots, m$ визначаємо формулою [10]:

$$\begin{aligned} \theta_i = & \frac{\theta_{н.с.i} I_D^2 \left(\frac{1}{\theta_D - \theta_o} + \alpha_T \right) + I_i^2 (1 - \alpha_T \theta_o)}{I_D^2 \left(\frac{1}{\theta_D - \theta_o} + \alpha_T \right) + I_i^2 \alpha_T} + \\ & + \left[\theta_{i-1} \frac{\theta_{н.с.i} I_D^2 \left(\frac{1}{\theta_D - \theta_o} + \alpha_T \right) + I_i^2 (1 - \alpha_T \theta_o)}{I_D^2 \left(\frac{1}{\theta_D - \theta_o} + \alpha_T \right) + I_i^2 \alpha_T} \right] \times \\ & \exp \left\{ - \frac{r_o(\theta_o) \delta t}{m_o c} \left[I_D^2 \left(\frac{1}{\theta_D - \theta_o} + \alpha_T \right) + I_i^2 \alpha_T \right] \right\}, \end{aligned} \quad (3.13)$$

де θ_D - тривало допустима температура жили провідника;

I_D - тривало допустимий струм жили провідника;

У кабелях тепло виділяється головним чином в дротах кабелю та практично не змінює свого значення по всій його. Так як кабель має неоднорідну структуру проводу, має свої конструктивні особливості та поперечний переріз то і процес зміни температури буде математично виражатися рівняннями в частинних похідних [11]. Вибір перерізу провідника здійснюється по табличним даним з врахуванням розрахункового струм та конкретного графіка навантаження [12].

Згідно літературного джерела [13] для трижильного кабелю прокладеного відкрито по будівельним конструкція, рівняння теплового балансу матиме формулу:

$$3I^2 R_o (1 + \alpha \vartheta) dt = C d\vartheta + A \vartheta dt. \quad (3.14)$$

У лівій частині показано всю теплову енергію, яка виділяється протягом часу dt , а в правій частині - загальна кількість тепла, що виділяється у кабелі. Ця кількість тепла розподіляється між теплом, яке витрачається за той же період на підвищення температури кабелю в порівнянні з оточуючим повітрям ϑ , і теплом, яке віддається в навколишнє середовище.

Рівняння перегріву кабелю відносно навколишнього середовища з достатньою мірою точності можна написати:

$$\frac{C}{A} \frac{d\vartheta}{dt} + \left(1 - 3I^2 \frac{R_o \alpha}{A} \right) \vartheta = 3I^2 \frac{R_o}{A}, \quad (3.15)$$

Коефіцієнт сумарну тепловіддачі A в повітря навколишнього середовища

$$A_0 = \frac{3I_N^2}{\vartheta_N} R_o. \quad (3.16)$$

$$A_1 = \frac{3I_N^2}{\vartheta_N} R_o (1 + \alpha \vartheta_N); \quad (3.17)$$

Виконуємо подальше перетворення формули 3.15, отримаємо наступні вирази :

$$\lambda_1 T_0 \frac{d\vartheta_1}{dt} + \vartheta_1 = \lambda_1 \vartheta_N \left(\frac{I}{I_N} \right)^2; \quad (3.18)$$

$$T_0 \frac{d\vartheta_0}{dt} + \vartheta_0 = \vartheta_N \left(\frac{I}{I_N} \right)^2; \quad (3.19)$$

Сталу часу нагріву T_0 та λ матимуть вираз

$$\begin{cases} \lambda = \frac{1}{1 + \alpha \vartheta_N \left[1 - \left(\frac{I}{I_N} \right)^2 \right]}; \\ T_0 = \frac{C}{A_0} = \frac{C \vartheta_N}{3 I_N^2 R_0}. \end{cases} \quad (3.20)$$

Підвищені значення температури перегріву ϑ_1 , ϑ_0 кабелю на прямопропорційні їм змінні z_1 , z_0 матимуть вираз:

$$\vartheta_0 = z_0 \frac{\vartheta_N}{I_N^2}; \quad (3.21)$$

$$\vartheta_1 = z_1 \frac{\vartheta_N}{I_N^2}.$$

Тоді рівняння (3.18) і (3.19) матимуть вигляд:

$$\lambda_1 T_0 \frac{dz_1}{dt} + z_1 = \lambda_1 I^2; \quad (3.22)$$

$$T_0 \frac{dz_0}{dt} + z_0 = I^2. \quad (3.23)$$

Результати спрощеного моделювання показують приблизні значення процесу перегріву силового.

3.4 Аналіз досліджуваного силового кабелю

Проведемо аналіз досліджуваного силового кабелю на прикладі досить широко відомого ААШв 3х35 - 10 кВ [21].

ААШв 3х35 - це силовий кабель - 3 х 35 мм², з встановленою алюмінієвою жилою, зі спеціальною просоченою паперовою ізоляцією, зі розміщеною алюмінієвою поверхневою оболонкою та захисним шлангом із полімер вінілхлориду.

Номинальна змінна напруга на який розрахований кабель становить ААШв 3х35	10 кВ
---	-------

Кількість жил із яких складається кабель	3 жили
--	--------

Переріз розмір для обраного кабелю становить	35 мм ²
--	--------------------

До технічних характеристик ААШв 3х35 можна віднести таку як вага кабелю.

Теоретична вага одного встановленого кілометра ААШв 3х35 становить 1447,00 кілограм на один кілометр проводу.

Вага кабелю значною мірою залежить від технічних умов конкретного заводу виробника, який загалом вказують на сайтах виробників та у яких можна уточнити інформацію.

Кабелі мають бути намотані на барабани.

Діаметр кабелю, а саме зовнішній діаметр кабелю ААШв 3х35 повинен становити 33,0 міліметра.

Зовнішній діаметр перерізу залежить від технічних умов конкретного заводу, який загалом вказують на сайтах виробників та у яких можна уточнити інформацію.

Розміри обраного кабелю враховуються при технічних розрахунках і правильному підборі та виборі систем які називають кабеленесучими.

Також важливе значення мають електричні характеристики обраного кабелю, а саме для обраного нами кабелю ААШв 3х35 відносяться: номінальна змінна напруга живлення -10 кВ, номінальна частота становить - 50 Гц, активний опір становить 0,52 Ом/км, індуктивний опір становить 0,095 Ом/км [14].

Струмове навантаження для обраного нами кабелю ААШв 3х35 розраховане на тривало-допустиму струмову роботу, при нормальному режимі роботи становить в повітрі 142 Ампер а на землі 144 Ампер при умові 100% коефіцієнті навантаження.

Максимальна потужність нашого кабелю при прокладенні загалом не розраховуються, оскільки це значення є не доцільним для високовольтної напруги 10кВ.

Також допустимі струмові навантаження розраховують за наступними розрахунковими умовами по-перше струмові навантаження вибираються не для постійного, а для змінного струму; температура навколишнього середовища приймаються при прокладенні на повітрі - 25 °С, а 15 °С при прокладенні в землі; мінімальна глибина прокладення кабелю в землі приймається 0,7 м; також приймається 1,2 км/Вт питомий термічний опір ґрунту [17].

Допустимий струм короткого замикання для силового ААШв 3х35, повинен відповідати максимально допустимій температурі при к. з. і дорівнювати 1 секундi тривалості процесу

Застосування ААШв 3х35 для прокладення в кабельних спорудах і приміщеннях виробничого напрямку; в землі (траншеях), тунелях, каналах, колекторах, по естакадах і мостах.

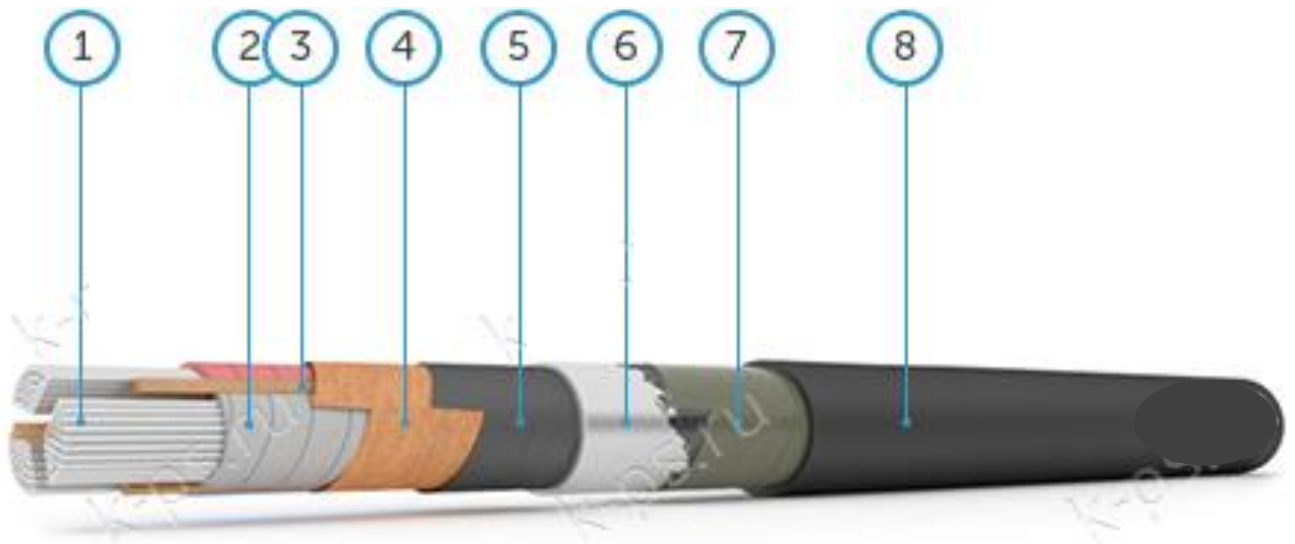


Рисунок 3.6 Конструктивне виконання кабелю ААШв 3х35: 1 – три алюмінієві струмопровідні жили; 2 – ізоляція (фазна) паперова просочена ізоляційним просочувальним матеріалом; 3 – джгути з паперових заповненням; 4 - ізоляція (поясна) паперова просочена ізоляційним просочувальним матеріалом; 5 – екран; 6 – оболонка алюмінієва; 7 – покрив, стрічка з бітумним клеючим матеріалом; 8 – захисна оболонка з ПВХ пластикату.

3.5 Визначення електричних показників силового кабелю

При номінальному навантаженні обраного кабелю $I = I_n$, стале перевищення навколишньої температури $\tau_y = \tau_n$ при номінальній (розрахунковій) температурі довілля $\vartheta_{cp} = \vartheta_{cp,n}$. Підставивши прийняті значення знаходимо розрахункову формулу:

$$\tau_n = \frac{r_0 I_n^2}{\mathcal{L}_C - r_0 \alpha I_n^2},$$

Звідки теплову провідність $\mathcal{L}_C$ становитиме

$$\mathcal{L}_C = r_0 I_n^2 \left(\frac{1}{\tau_n} + \alpha \right)$$

При навантаженні, відмінному від номінальної, струм $I = \kappa I_n$,

де κ – кратність сили струму по відношенню до значення номінального.

Підставимо прийняте вираження для струму і теплової провідності $\mathcal{L}_C$ в приведені рівняння і отримаємо:

$$\tau_y = \frac{\kappa^2 \tau_n}{1 - \alpha \tau_n (\kappa^2 - 1)},$$

$$T = \frac{C \tau_n}{r_0 I_n^2 (1 - \alpha \tau_n (\kappa^2 - 1))}$$

Номінальне перевищення температури можна прийняти, враховуючи норми для кабелю, в межах $\tau_n = 65^\circ\text{C}$.

Тривало допустима температура, враховуючи норми, для силового кабеля 70/60 °C при температуру навколишнього середовища приймемо $\vartheta_{cp} = 25^\circ\text{C}$. Тривало-допустимі струмові навантаження у нормальному режимі роботи кабеля при повному (100%) коеф. навантаження: якщо це в повітрі то - 142 А, а якщо це на землі 144 А.

В експлуатації навантаження силових кабелів має характер, що постійно змінюється, тому сталі теплові режими роботи рідко коли мають місце. Характерними ж в експлуатації є перехідні теплові процеси, які обумовлені теплоємностями кабелю.

Теплоємності будемо розраховувати по формулі [2]:

$$C = C_{al} \cdot m = 925 \cdot 1147 = 1,338 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^\circ\text{C}}.$$

де C_{al} - питома теплоємність для обмотки (алюміній) кабелю становить, 925 (Вт·с)/(°C·кг);

m - маса матеріалу (проводу) кабелю, кг .

Опір проводу кабелю, згідно його технічних даних наведених раніше, при температурі зовнішнього навколишнього середовища 20 °С становить:

$$r_o = 0.52 \text{ Ом/км};$$

Температурний коефіцієнт опору матеріалу провідника (алюміній) прийнятого силового кабелю має значення:

$$\alpha = 0,004 \text{ 1/}^\circ\text{C}.$$

Еквівалентна постійна часу нагріву силового кабелю розраховується за формулою:

$$T = \frac{65 \cdot 1,338 \cdot 10^3}{0.52 \cdot 142^2 \cdot (1 - 0.004 \cdot 65 \cdot (1^2 - 1))} = 2.3 \text{ год}$$

Приймаємо значення постійного коефіцієнта $B = 9500 \text{ K}$, відповідно значення класу А ізоляційних матеріалів.

Абсолютна номінальна температура буде відповідно значення класу ізоляції А становить $\theta_n = 378 \text{ K}$.

3.6 Дослідження впливу форми графіка навантаження силового кабелю на добове теплове зношення ізоляції

Розглянемо запропонований графік навантаження №1 силового кабелю рис 3.7 і дослідимо графік швидкості теплового зношення ізоляції в квазісталому режимі роботи силового кабелю при змінній температурі навколишнього середовища для літнього відомого періоду 9.06.2020 [18] року яка змінюється відповідно наведена в табл 3.1.

Спочатку визначимо перевищення температури ізоляції в кінцевих точках часу графіка ($t = 0$ і $t = 24$ години) за формулою):

$$\tau_0 = \frac{1-\vartheta}{1-\vartheta^n} \cdot \sum_{i=1}^n \vartheta^{n-i} \tau_{iv} \quad (3.24)$$

$$\vartheta = e^{-\frac{t_i}{T}}, \quad (3.25)$$

$$\tau_{iv} = \tau_n \frac{\kappa_i^2}{1 - \alpha \tau_n (\kappa_i^2 - 1)}. \quad (3.26)$$

де $i=1,2,3,\dots,n$; $n=24$; $t_i=1$ год; $T=2.3$ год.

Підставивши значення необхідних величин, знаходимо

$$\tau_0 = 18,55^\circ\text{C}$$

Перевищення температури в кінці кожної ділянки графіка знаходимо за формулою:

$$\tau_i = \tau_{iv} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_{i-1} \cdot e^{-\frac{t_i}{T}}, \quad (3.27)$$

Швидкість теплового зношення ізоляції в кінці кожної ділянки графіка навантаження кабелю знаходимо за формулою:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n e^{B \left(\frac{1}{\Theta_n} - \frac{1}{\tau_i + \vartheta_{cp,i} + 273} \right)}, \quad (3.28)$$

$B=9500$ K, $\theta_n=378$ K, $\varepsilon_n=1$ год/год.

Результати розрахунків заносимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Графіки добового навантаження кабелю і швидкості його теплового зношення ізоляції.

t_i , год	k_i	t , °C	τ_{iy} , °C	τ_i , °C	ε_i , бгод/год
0	0,45	20	10,902	18,550	0,0005
1	0,45	19	10,902	16,382	0,0005
2	0,45	19	10,902	14,829	0,0003
3	0,45	19	10,902	13,716	0,0003
4	0,45	18	10,902	12,918	0,0002
5	0,5	17	13,598	13,111	0,0002
6	0,5	16	13,598	13,249	0,0003
7	0,8	14	38,040	20,276	0,0006
8	0,9	20	50,172	28,751	0,0014
9	1	21	65,000	39,026	0,0040
10	1	21	65,000	46,389	0,0082
11	0,9	23	50,172	47,461	0,0100
12	0,8	24	38,040	44,790	0,0078
13	0,9	25	50,172	46,316	0,0099
14	0,9	26	50,172	47,409	0,0109
15	1	22	65,000	52,395	0,0188
16	1	23	65,000	55,968	0,0236
17	0,9	24	50,172	54,325	0,0187
18	0,8	23	38,040	49,709	0,0112
19	0,6	22	20,062	41,305	0,0051
20	0,6	22	20,062	35,283	0,0031
21	0,5	21	13,598	29,136	0,0016
22	0,5	23	13,598	24,732	0,0010
23	0,5	22	13,598	21,576	0,0007
24	0,45	20	10,902	18,550	0,0005

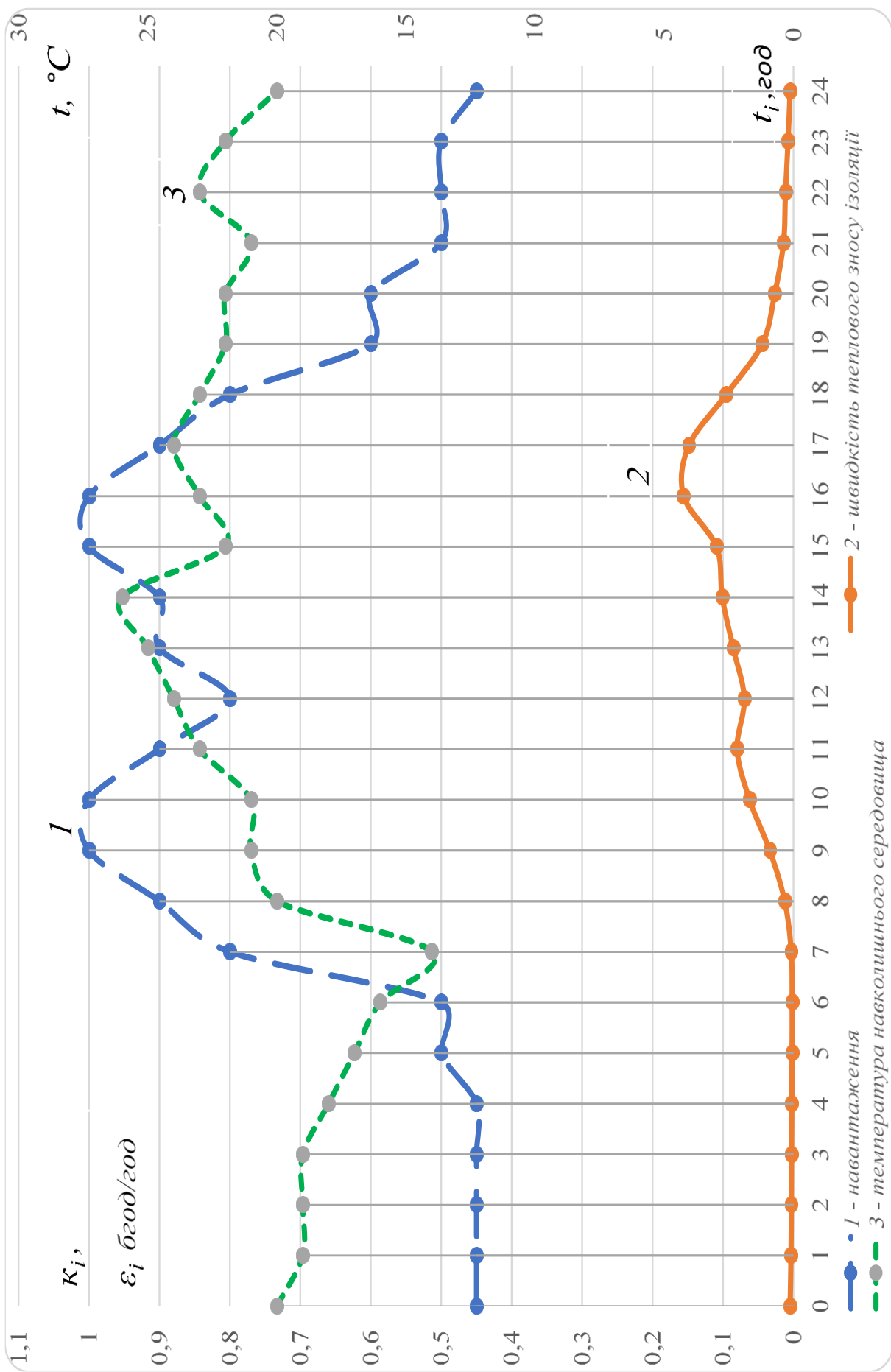


Рисунок 3.7 - Графіки №1 навантаження та швидкості теплового зношення ізоляції силового кабелю.

Знаходимо добове значення зношення ізоляції кабелю за формулою:

$$E_{\text{доб}} = \sum_{i=1}^n t_i \varepsilon_i$$

Для проведення розрахунку спочатку знаходимо початкове:

$$\tau_0 = 18,55^{\circ}\text{C}$$

В результаті розрахунку отримуємо:

$$E_{\text{доб}} = 1,085 \text{ год}$$

Збільшуючи сумарне навантаження кабелю на 10%, складаємо графік навантаження №2 (рис 3.8) з поступовим збільшенням навантаження на протязі доби і дослідимо графік швидкості теплового зношення ізоляції при квазісталому режимі роботи силового кабелю та з врахуванням змінної температури навколишнього середовища.

Для проведення розрахунку спочатку знаходимо:

$$\tau_0 = 26,13^{\circ}\text{C}$$

В результаті розрахунку отримуємо:

$$E_{\text{доб}} = 3,249 \text{ год}$$

Результати розрахунку графіків заносимо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 - Графіки добового навантаження кабелю і швидкості його теплового зношення ізоляції.

$t_i, \text{год}$	k_i	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau_{iy}, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_i, \text{бгод/год}$
0	0,55	20	16,644	26,134	0,010
1	0,55	19	16,644	23,444	0,007
2	0,55	19	16,644	21,516	0,006
3	0,55	19	16,644	20,135	0,005
4	0,55	18	16,644	19,146	0,004
5	0,6	17	20,062	19,405	0,004
6	0,6	16	20,062	19,591	0,004
7	0,9	14	50,172	28,260	0,007
8	1	20	65,000	38,675	0,030
9	1,1	21	83,192	51,294	0,093
10	1,1	21	83,192	60,336	0,187
11	1	23	65,000	61,658	0,239
12	0,9	24	50,172	58,402	0,202
13	1	25	65,000	60,272	0,251
14	1	26	65,000	61,613	0,298
15	1,1	22	83,192	67,730	0,347
16	1,1	23	83,192	72,113	0,509
17	1	24	65,000	70,097	0,474
18	0,9	23	50,172	64,448	0,294
19	0,7	22	28,121	54,151	0,125
20	0,7	22	28,121	46,772	0,070
21	0,6	21	20,062	39,201	0,034
22	0,6	23	20,062	33,775	0,025
23	0,6	22	20,062	29,888	0,016
24	0,55	20	16,644	26,134	0,010

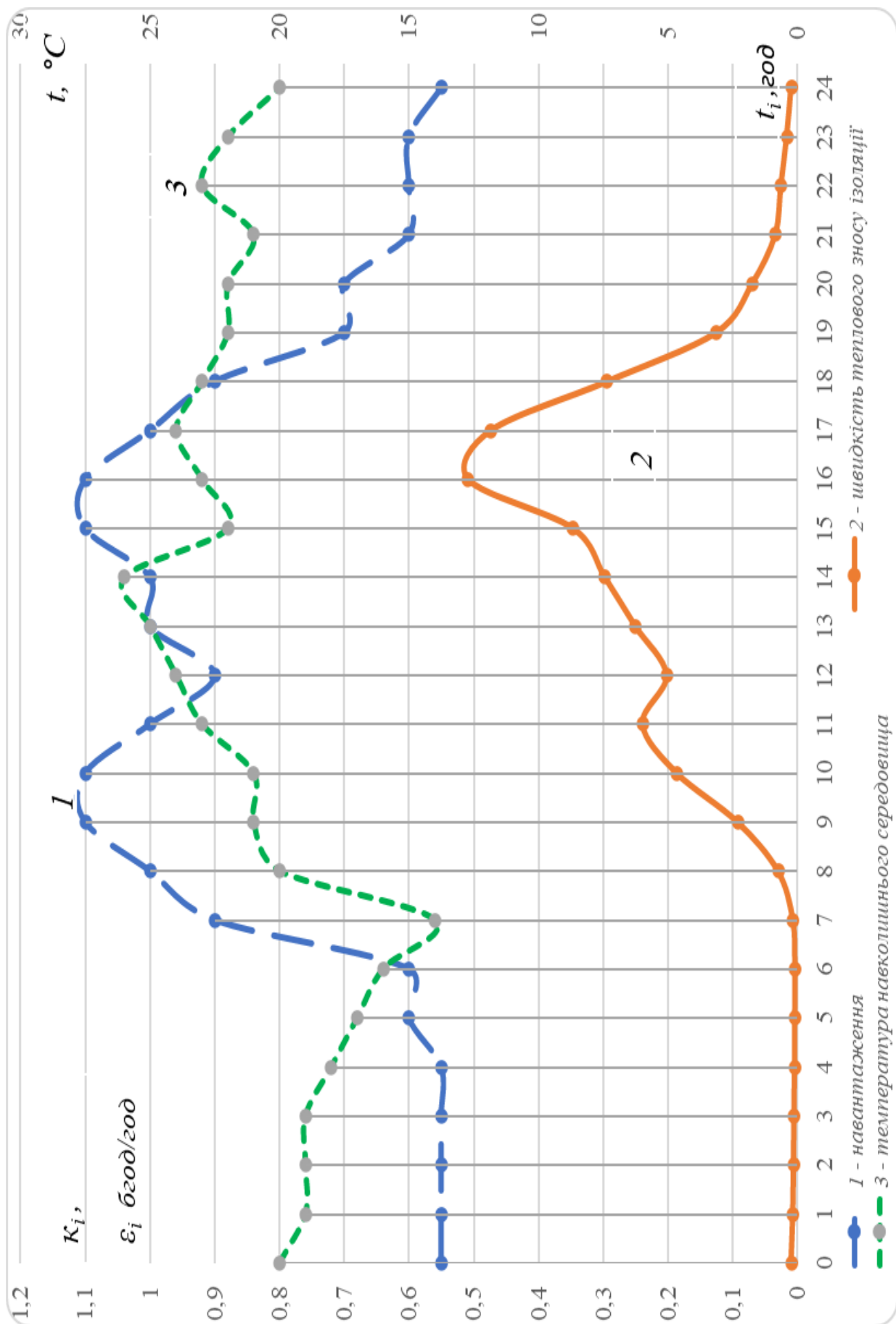


Рисунок 3.8 - Графіки №2 навантаження та швидкості теплового зношення ізоляції силового кабелю.

Збільшуючи сумарне навантаження кабелю на 20%, складаємо графік навантаження №3 (рис. 3.9) з поступовим зменшенням навантаження на протязі доби і дослідимо графік швидкості теплового зношення ізоляції в квазісталому режимі роботи силового кабелю при змінній температурі навколишнього середовища.

Для проведення розрахунку спочатку знаходимо:

$$\tau_0 = 35,56^{\circ}\text{C}$$

Результати розрахунку графіків заносимо в таблицю 3.3.

В результаті розрахунку отримаємо:

$$E_{\text{дог}} = 11,274 \text{ год}$$

Проведемо аналогічні розрахунки для зимового періоду доби на прикладі приймемо для розрахунку 9.01.2020 рік. [19]

Для проведення розрахунків спочатку знаходимо:

$$\tau_0 = 18,55^{\circ}\text{C}$$

Результати розрахунку графіків заносимо в таблицю 3.4.

В результаті розрахунку отримаємо:

$$E_{\text{дог}} = 0,139 \text{ год}$$

Збільшуючи сумарне навантаження кабелю на 10%, складаємо графік навантаження №2 (рис 4.6) з поступовим збільшенням навантаження на протязі зимової доби і дослідимо графік швидкості теплового зношення ізоляції в квазісталому режимі роботи силового кабелю при змінній температурі навколишнього середовища.

Таблиця 3.3 - Графіки добового навантаження кабелю і швидкості його теплового зношення ізоляції кабелю.

t_i , год	k_i	t , °C	τ_{iy} , °C	τ_i , °C	ε_i , бгод/год
0	0,65	20	23,877	35,559	0,023
1	0,65	19	23,877	32,247	0,016
2	0,65	19	23,877	29,875	0,012
3	0,65	19	23,877	28,175	0,011
4	0,65	18	23,877	26,957	0,009
5	0,7	17	28,121	27,287	0,008
6	0,7	16	28,121	27,523	0,008
7	1	14	65,000	38,147	0,017
8	1,1	20	83,192	50,916	0,083
9	1,2	21	105,691	66,443	0,294
10	1,2	21	105,691	77,568	0,647
11	1,1	23	83,192	79,163	0,827
12	1	24	65,000	75,148	0,674
13	1,1	25	83,192	77,428	0,842
14	1,1	26	83,192	79,062	1,004
15	1,2	22	105,691	86,611	1,268
16	1,2	23	105,691	92,019	1,914
17	1,1	24	83,192	89,517	1,740
18	1	23	65,000	82,567	1,038
19	0,8	22	38,040	69,945	0,407
20	0,8	22	38,040	60,901	0,210
21	0,7	21	28,121	51,609	0,095
22	0,7	23	28,121	44,951	0,065
23	0,7	22	28,121	40,180	0,040
24	0,65	20	23,877	35,559	0,023

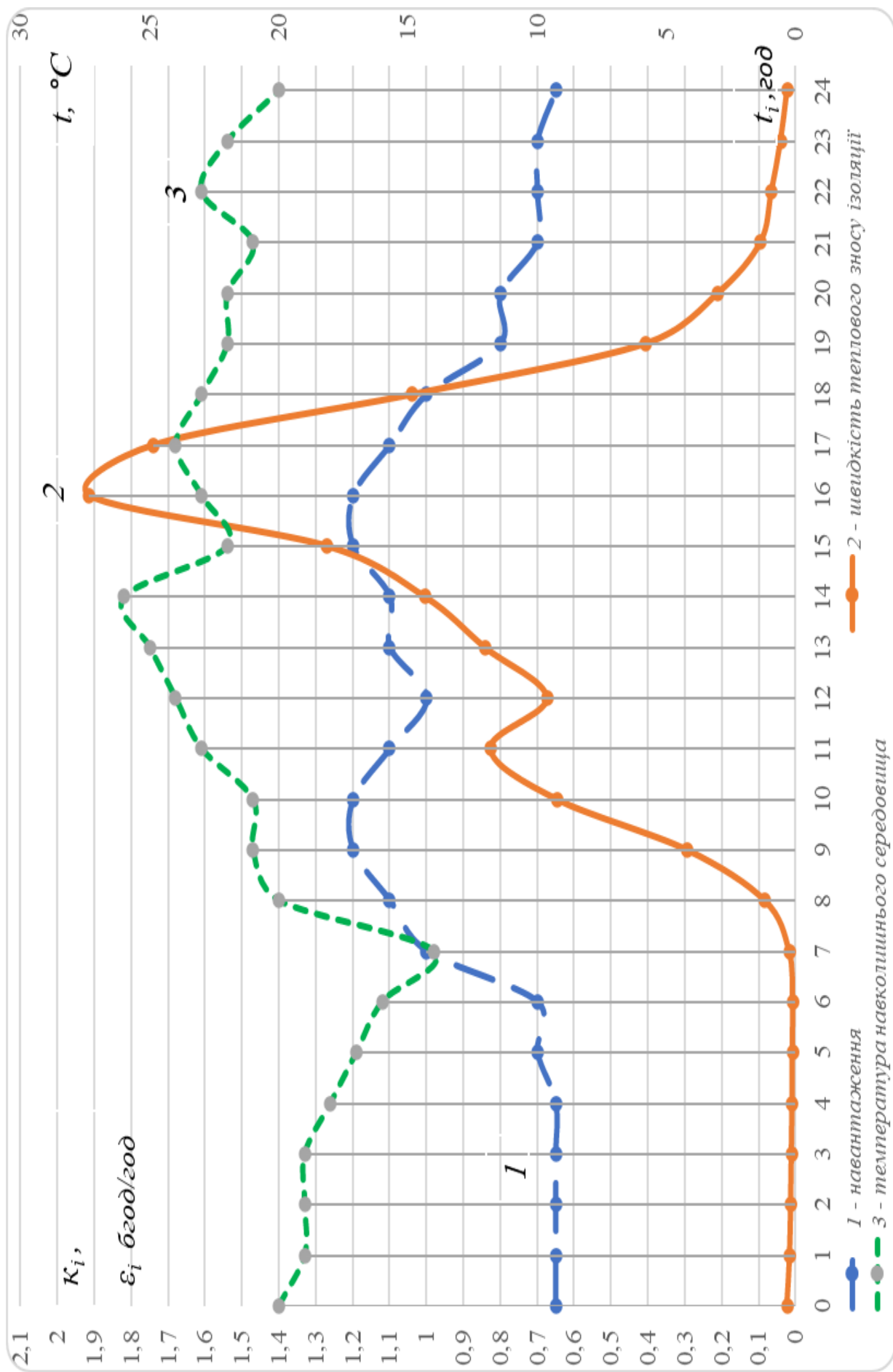


Рисунок 3.9 - Графіки №3 навантаження та швидкості теплового зношення ізоляції силового кабелю.

Таблиця 3.4 - Графіки добового навантаження кабелю і швидкості його теплового зношення ізоляції кабелю.

t_i , год	k_i	t , °C	τ_{iy} , °C	τ_i , °C	ε_i , бгод/год
0	0,45	-2	10,902	18,550	0,0005
1	0,45	0	10,902	16,382	0,0005
2	0,45	-1	10,902	14,829	0,0003
3	0,45	-2	10,902	13,716	0,0003
4	0,45	-2	10,902	12,918	0,0002
5	0,5	-2	13,598	13,111	0,0002
6	0,5	-2	13,598	13,249	0,0003
7	0,8	-2	38,040	20,276	0,0006
8	0,9	-2	50,172	28,751	0,0014
9	1	-2	65,000	39,026	0,0040
10	1	-2	65,000	46,389	0,0082
11	0,9	-1	50,172	47,461	0,0100
12	0,8	-1	38,040	44,790	0,0078
13	0,9	0	50,172	46,316	0,0099
14	0,9	0	50,172	47,409	0,0109
15	1	1	65,000	52,395	0,0188
16	1	0	65,000	55,968	0,0236
17	0,9	-1	50,172	54,325	0,0187
18	0,8	-2	38,040	49,709	0,0112
19	0,6	-2	20,062	41,305	0,0051
20	0,6	-1	20,062	35,283	0,0031
21	0,5	-1	13,598	29,136	0,0016
22	0,5	-1	13,598	24,732	0,0010
23	0,5	-2	13,598	21,576	0,0007
24	0,45	-2	10,902	18,550	0,0005

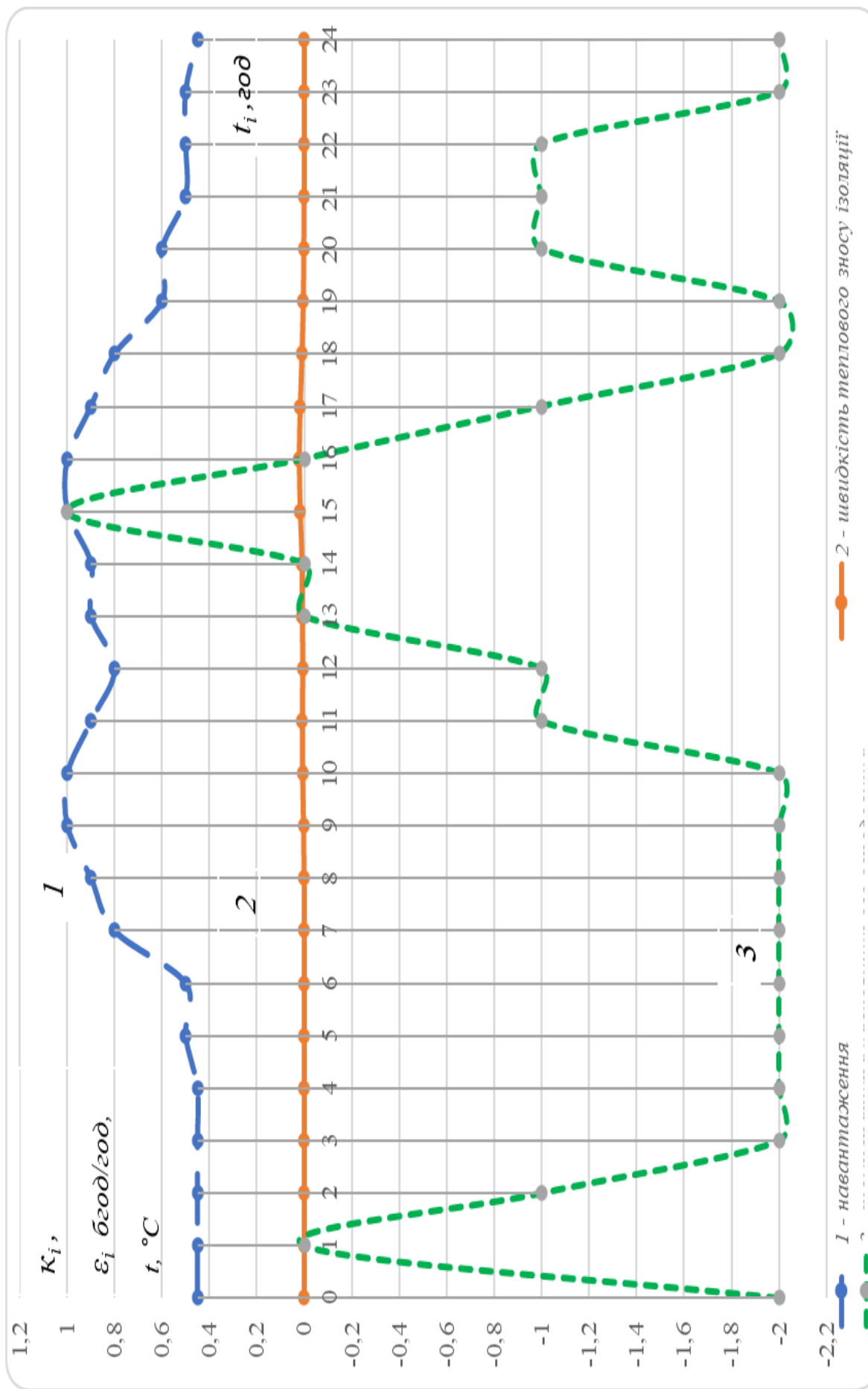


Рисунок 3.10 - Графіки №1 навантаження та швидкості теплового зношення ізоляції силового кабелю.

Таблиця 3.5 - Графіки добового навантаження кабелю і швидкості його теплового зношення ізоляції кабелю.

$t_i, \text{год}$	k_i	$t, ^\circ\text{C}$	$\tau_{iy}, ^\circ\text{C}$	$\tau_i, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon_i, \text{бгод/год}$
0	0,55	-2	16,644	26,134	0,001
1	0,55	0	16,644	23,444	0,001
2	0,55	-1	16,644	21,516	0,001
3	0,55	-2	16,644	20,135	0,001
4	0,55	-2	16,644	19,146	0,000
5	0,6	-2	20,062	19,405	0,001
6	0,6	-2	20,062	19,591	0,001
7	0,9	-2	50,172	28,260	0,001
8	1	-2	65,000	38,675	0,004
9	1,1	-2	83,192	51,294	0,013
10	1,1	-2	83,192	60,336	0,029
11	1	-1	65,000	61,658	0,035
12	0,9	-1	50,172	58,402	0,027
13	1	0	65,000	60,272	0,034
14	1	0	65,000	61,613	0,038
15	1,1	1	83,192	67,730	0,069
16	1,1	0	83,192	72,113	0,091
17	1	-1	65,000	70,097	0,072
18	0,9	-2	50,172	64,448	0,041
19	0,7	-2	28,121	54,151	0,017
20	0,7	-1	28,121	46,772	0,009
21	0,6	-1	20,062	39,201	0,005
22	0,6	-1	20,062	33,775	0,003
23	0,6	-2	20,062	29,888	0,002
24	0,55	-2	16,644	26,134	0,001

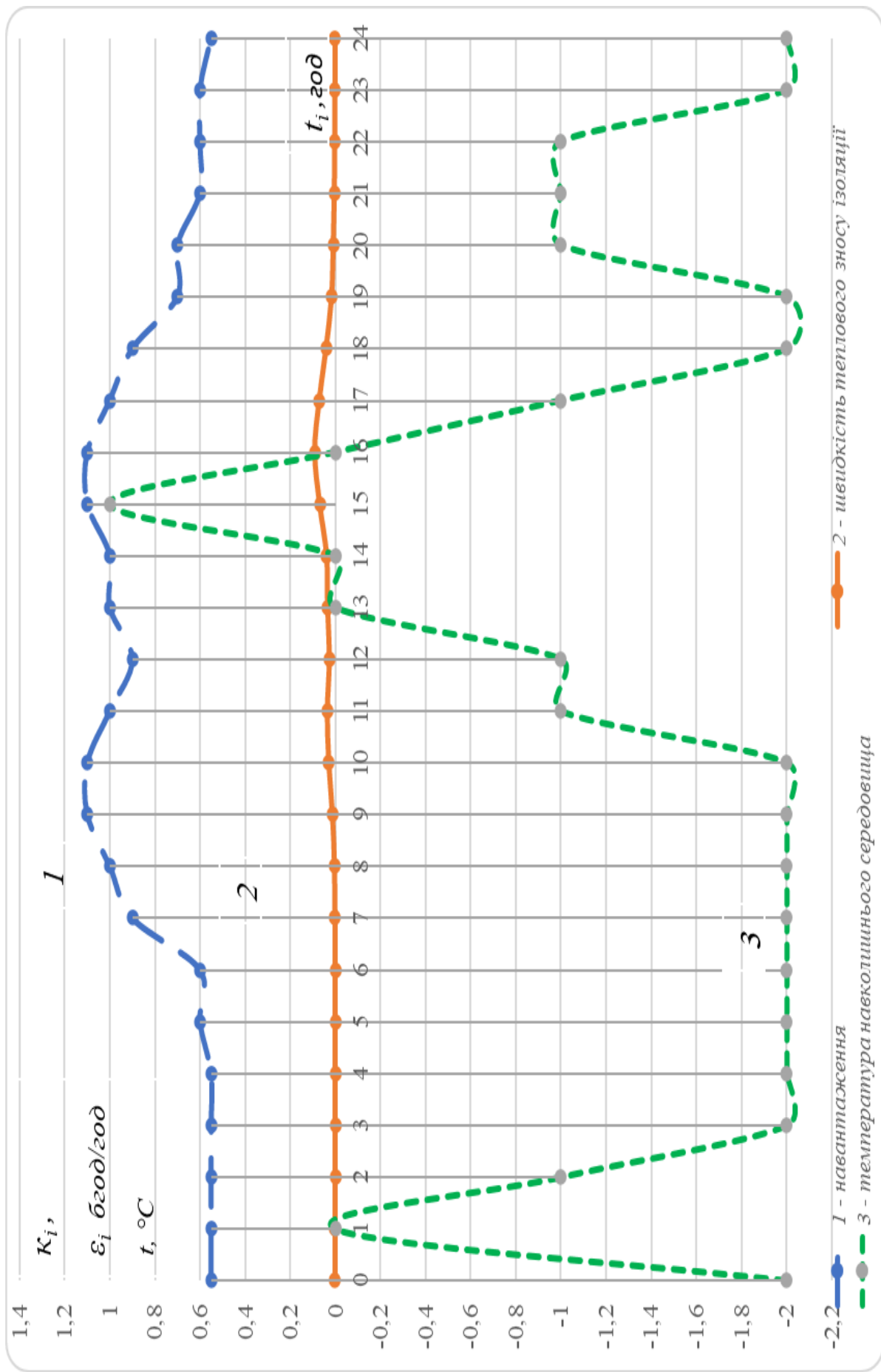


Рисунок 3.11 - Графіки №2 навантаження та швидкості теплового зношення ізоляції силового кабелю.

Для проведення розрахунку знаходимо:

$$\tau_0 = 26,13^{\circ}\text{C}$$

Результати розрахунку графіків заносимо в таблицю 3.5.

В результаті розрахунку отримаємо:

$$E_{\text{доб}} = 0,496 \text{ год}$$

Збільшуючи сумарне навантаження кабелю на 20%, складаємо графік навантаження №3 (рис. 3.12) з поступовим зменшенням навантаження на протязі доби і дослідимо графік швидкості теплового зношення ізоляції в квазісталому режимі роботи силового кабелю при змінній температурі навколишнього середовища.

Для проведення розрахунку спочатку знаходимо:

$$\tau_0 = 35,56^{\circ}\text{C}$$

Результати розрахунку графіків заносимо в таблицю 3.6.

В результаті розрахунку отримаємо:

$$E_{\text{доб}} = 2,075 \text{ год}$$

Складаємо порівняльну таблицю 3.7 добового теплового зношення ізоляції силового кабелю при різних значеннях графіках навантаження і температурі навколишнього середовища.

Таблиця 3.6 - Графіки добового навантаження кабелю і швидкості його теплового зношення ізоляції.

t_i , год	k_i	t , °C	τ_{iy} , °C	τ_i , °C	ε_i , бгод/год
0	0,65	-2	16,644	26,134	0,001
1	0,65	0	16,644	23,444	0,001
2	0,65	-1	16,644	21,516	0,001
3	0,65	-2	16,644	20,135	0,001
4	0,65	-2	16,644	19,146	0,000
5	0,7	-2	20,062	19,405	0,001
6	0,7	-2	20,062	19,591	0,001
7	1	-2	50,172	28,260	0,001
8	1,1	-2	65,000	38,675	0,004
9	1,2	-2	83,192	51,294	0,013
10	1,2	-2	83,192	60,336	0,029
11	1,1	-1	65,000	61,658	0,035
12	1	-1	50,172	58,402	0,027
13	1,1	0	65,000	60,272	0,034
14	1,1	0	65,000	61,613	0,038
15	1,2	1	83,192	67,730	0,069
16	1,2	0	83,192	72,113	0,091
17	1,1	-1	65,000	70,097	0,072
18	1	-2	50,172	64,448	0,041
19	0,8	-2	28,121	54,151	0,017
20	0,8	-1	28,121	46,772	0,009
21	0,7	-1	20,062	39,201	0,005
22	0,7	-1	20,062	33,775	0,003
23	0,7	-2	20,062	29,888	0,002
24	0,65	-2	16,644	26,134	0,001

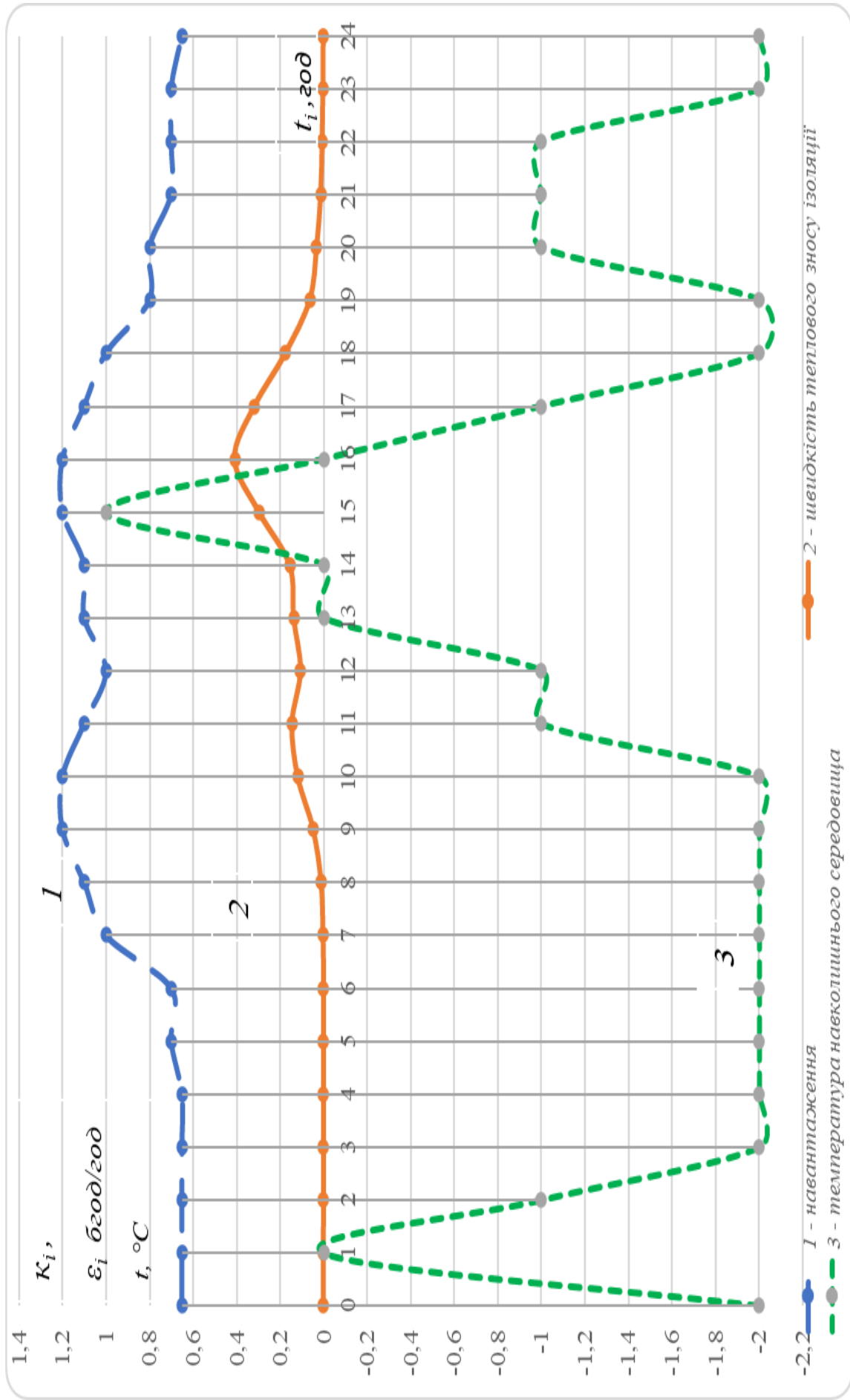


Рисунок 3.12 - Графіки №3 навантаження та швидкості теплового зношення ізоляції силового кабелю.

Таблиця 3.7 - Порівняльна таблиця добового теплового зношення ізоляції силового кабелю при різних графіках навантаження і температури.

Періоду року, температура навколишнього середовища, °C	Добове теплове зношення ізоляції для вказаних графіків навантаження		
	№1	№2	№3
літо	1,085	3,249	11,274
зима	0,139	0,496	2,075

3.7 Висновки до розділу 3

На підставі отриманих результатів теоретичних досліджень можна зробити висновок, що графік навантаження та температура навколишнього середовища впливають на процес теплового зносу ізоляції силового кабелю реалізується через формування теплового процесу в провіднику. Цей тепловий процес визначає середню швидкість теплового зносу ізоляції за один добовий цикл роботи кабелю. Форма графіку навантаження та зміни температурного режиму середовища суттєво впливають на обсяг сумарного теплового зносу ізоляції за добовий цикл роботи. Важливо відзначити, що збільшення амплітуди графіку навантаження на 10% призводить до практичної трієкратної зміни добового теплового зносу ізоляції силового кабелю, а збільшення навантаження на 20% викликає зростання більше, ніж в десять разів.

Визначено критерії моніторингу стану силового кабелю, серед яких важливими є швидкість теплового зносу ізоляції кабелю та сумарне його значення теплового зносу ізоляції.

РОЗДІЛ 4.

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИЛОВОГО КАБЕЛЮ

Як було показано в розділі 3, форма графіка навантаження при одному і тому ж значенню добового споживання електричної енергії має значний вплив на добове теплове зношення ізоляції силового кабелю. Таким чином, для об'єктивної оцінки експлуатаційного режиму роботи силового кабелю необхідно розробити, або використати існуючі, і встановити лічильник теплового зношення ізоляції силового кабелю.

4.1 Алгоритм діагностування експлуатаційних режимів роботи силового кабеля

З метою діагностики експлуатаційних режимів силового кабеля рекомендовано проводити вимірювання фазових діючих значень електричних струмів, які споживаються силовими споживачами, а також фіксувати температурні параметри навколишнього середовища. Застосовуючи ці дані, визначати поточні параметри теплового зношення ізоляції, а також інтегрувати величину теплового впливу на ізоляційний матеріал протягом періоду його експлуатаційного використання [20,21].

На рисунку 4.1 наведена структурна схема системи діагностування на прикладі силового кабеля, що дає можливість дистанційно аналізувати його стан ізоляції.

Складаємо алгоритм діагностування експлуатаційних режимів роботи силового кабеля:

Вимірюємо діючі значення сил електричних струмів в кожній фазі силового кабеля та визначаємо температуру навколишнього середовища.

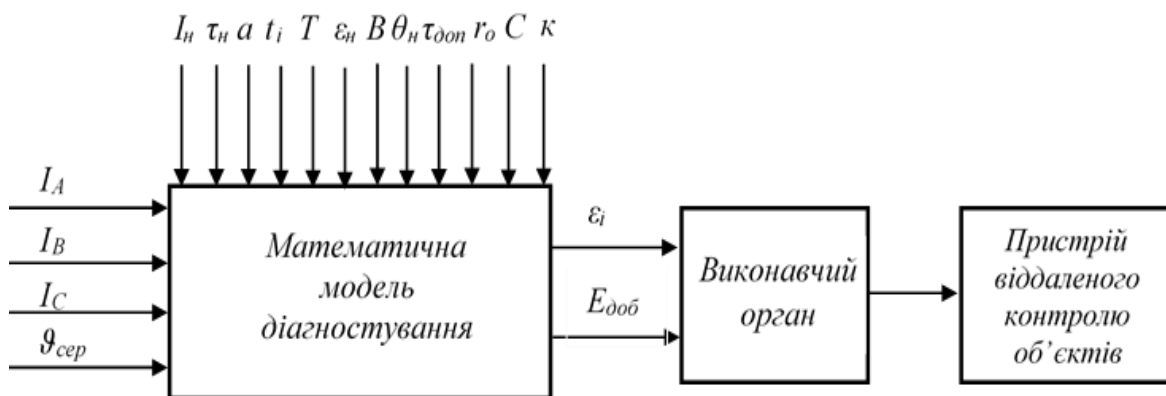


Рисунок 4.1 – Схема системи діагностування силового кабеля

Знаходимо обчислення середньоквадратичного значення сил електричних струмів, які споживає силовий кабель на i -й ділянці графіка навантаження:

$$I_{ісеркв} = \sqrt{\frac{I_{iA}^2 + I_{iB}^2 + I_{iC}^2}{3}}, \quad (4.1)$$

Знаходимо для кабелю, усталене перевищення температури на i -й ділянці графіка навантаження:

$$\tau_y = \frac{\kappa^2 \tau_n}{1 - \alpha \tau_n (\kappa^2 - 1)}, \quad (4.2)$$

Знаходимо значення перевищення температури ізоляції кабелю на i -й ділянці графіка навантаження:

$$\tau_i = \tau_{iy} \left(1 - e^{-\frac{t_i}{T}} \right) + \tau_{i-1} \cdot e^{-\frac{t_i}{T}}, \quad (4.3)$$

Знаходимо швидкість теплового зношення ізоляції силового кабелю на i -й графіка навантаження [2]

$$\varepsilon_i = \varepsilon_n e^{B \left(\frac{1}{\theta_n} - \frac{1}{\tau_i + \theta_{exp} + 273} \right)}, \quad (4.4)$$

Знаходимо сумарне значення теплового зношення ізоляції силового кабелю:

$$E_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n t_i \varepsilon_i \quad (4.5)$$

4.2 Розробка структурної схеми дистанційного діагностування експлуатаційних режимів роботи силового кабелю

Силовим кабелям, зазвичай не проводяться постійні технічні обслуговування і поточні ремонти, а здійснюються огляди. Силові кабелі піддаються постійним неконтрольованим впливам експлуатаційних факторів, таких як перевантаження, великі пускові струми електродвигунів при умовах сумірної потужності, дії струмів короткого замикання на повітряних лініях електропередачі, вплив температури зовнішнього навколишнього середовища та сонячної випромінювальної радіації. Приведені експлуатаційні фактори можуть спричинити та викликати збільшену зносостійкість ізоляції проводу силового кабелю, що в свою чергу може призвести до виникнення проблем та відмов у роботі кабелю в цілому [20,21].

Отже, однією з ключових стратегій для підвищення експлуатаційної надійності силових кабелів є впровадження систем дистанційного діагностування, яка дозволяють моніторити режими їх експлуатаційної роботи дистанційно.

Відповідно до структурної схеми функціонального діагностування

силових кабелів (рис. 4.1), запропоновано структурну схему системи для дистанційного діагностування та забезпечення збереження ресурсу ізоляції при експлуатаційних режимах роботи силового кабеля (рис. 4.2).

Система буде працювати наступним чином, від пристрою автоматичного керування (мікроконтролера МК), який отримує від силового кабеля актуальні (діючі) значення фазних струмів, обчислює їх середньоквадратичне значення і за допомогою створеної програми проводить аналіз експлуатаційного режиму роботи силового кабеля, визначаючи поточну швидкість теплового зносу ізоляції кабелю. У випадку перевищення швидкості теплового зносу ізоляції вище встановленого нормативного значення, МК надсилає інформацію пристрою віддаленого контролю об'єктів, скорочено (ПВКО).

Детальна структурна схема пристрою по блочно представлена на рис. 4.2. На даному рисунку представлені наступні блоки: блок живлення (БЖ); мікроконтролер (МК); блок вимірювання фазних струмів (БВФС); запам'ятовуючий пристрій (ЗП); блок вимірювання температури навколишнього середовища (БВТНС); блок обміну даних (БОД); комутаційний порт (КП).

Алгоритм роботи системи (пристрою) діагностування визначається програмним управлінням мікроконтролера, який виступає основним елементом цього пристрою, а не схемним рішенням. Для діагностування, наприклад кабельної лінії, розробляється математична модель теплових процесів, яка враховує експлуатаційні фактори і режими роботи жил кабелю. Ця математична модель виступає основним керуючим елементом в алгоритмі роботи пристрою і архітектурі його структури діагностування.

Запропонований пристрій дозволяє визначати поточну температуру проводів, враховуючи кратність сил струму у фазах силового кабеля та поточну температуру навколишнього середовища. Також він здатен розраховувати швидкість теплового зношення ізоляції на кожній ділянці навантаження і загальну теплову витрату ресурсу ізоляції при заданих умовах графіка навантаження. Для реалізації цього методу діагностування використовується пристрій автоматичного керування мікроконтроллер, який виконує розрахунки

на основі математичної моделі теплових процесів в силовому кабелі. Мікроконтролер також відповідає за формування вихідних сигналів та збереження постійних базових параметрів математичної моделі. У своїй роботі він обслуговує підключені периферійні пристрої [20,21].

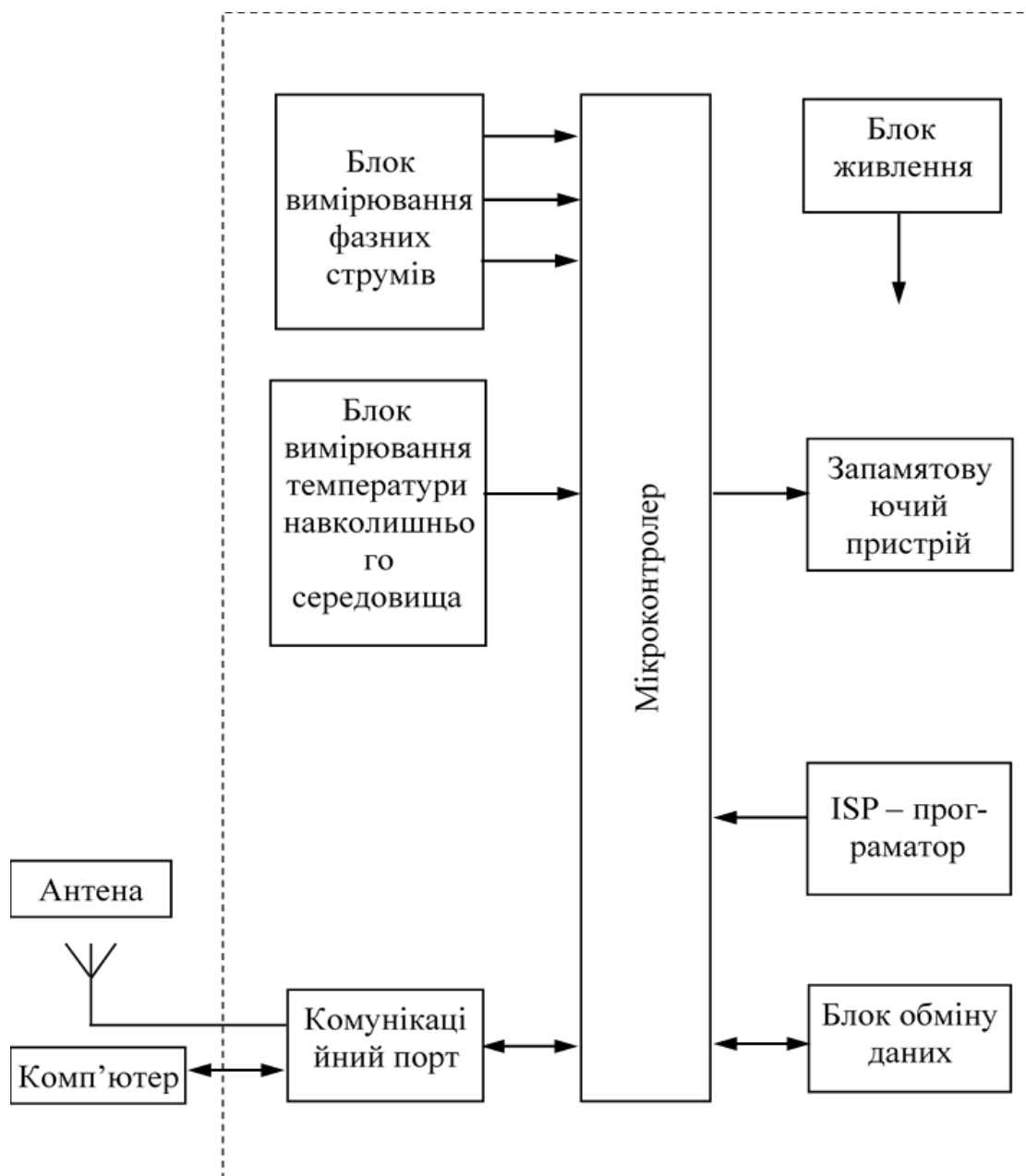


Рисунок 4.2 - Структурна схема пристрою діагностування.

БВФС блок виміру сили струму у фазах та БВТНС блок виміру температури довкілля відповідають за збір інформації про поточний стан силового кабелю та температури навколишнього середовища. Сигнали, отримані

в результаті вимірів, подаються на вхід мікроконтролера (МК), який здійснює подальше обробку цих даних. Мікроконтролер виконує функцію формування вихідних сигналів, що вказують на поточні значення контрольованих параметрів експлуатаційних режимів роботи кабеля. Такий підхід дозволяє здійснювати контроль і аналіз стану силового кабелю для забезпечення його ефективної експлуатації.

Пристрій діагностування реалізований з можливістю накопичення та архівування інформації про параметри експлуатаційних режимів силового кабелю в (ЗП) запам'ятовуючому блоці. Для фіксації отриманих контрольованих параметрів і аварійних ситуацій в часі використовується інтегрований мікроконтролерний блок, який має годинник реального часу. Цей мікроконтролерний блок надає можливість отримувати данні про стан кабелю в режимі реального часу.

Зібрана інформація про експлуатаційні параметри кабелю передається через комутаційний порт (КП) на інтерфейсний пристрій, яким може бути модем (GSM або GPRS) з вбудованим зчитувачем телефонної карти (SIM) або комп'ютера. Це забезпечує можливість моніторингу та аналізу стану кабелю у режимі реального часу, а також передачу інформації на зовнішні пристрої для подальшого аналізу та обробки даних.

Передача інформації реалізована за допомогою модуля GSM, загалом призначеного для передачі даних у діапазоні, залежно від апаратних рішень на 900МГц, 1800 МГц. До числа використовуваних модулів можуть різноманітні моделі, що широко представлені сьогодні на ринку та вирізняються компактним виконанням, високою надійністю і доступною вартістю. Модулі GSM керуються через недорогий мобільний телефон, за допомогою АТ-команд [24,25]

У будь-який момент часу оператор з мобільного телефону може вислати відповідну АТ-команду на GSM-модуль, за допомогою якої буде передана інформація про поточні значення контрольованих параметрів. У будь-який момент, користувач мобільного телефону може вислати відповідну команду (АТ-команду) на модуль GSM, що спричинить передачу інформації про поточні

значення контрольованих параметрів. Можливість здійснювати моніторинг роботи кабелю, що знаходиться на певній відстані можна використати через WEB-інтерфейс. Отримана працівником інформація, поступає до бази даних зовнішнього серверу Інтернет за використання мобільного зв'язку.

GSM-модуль з'єднується із персональним комп'ютером через COM-портом, здійснює роботу через спеціальні програми прямо з МК через USB-інтерфейс. За допомогою GSM- модуля чи GPRS-модуля експлуатаційно-обслуговуючий персонал отримує оперативну інформацію про стан контрольованого кабелю, з можливістю її збереження для подальшого перегляду, аналізу чи звітності. Отримана, таким чином технічна інформація дозволяє оцінити поточний стан силового кабеля, та сформулювати у разі необхідності рекомендації для проведення профілактичного обслуговування, ремонту чи дефектації.

Блок живлення забезпечує живлення пристрою та видає стабілізовану на 5 В напругу. Алгоритм розрахунку вихідних параметрів діагностування, запис спеціальної програм керування здійснює блок обміну даними. Також, він використовується для введення постійних даних матмоделі теплових процесів в кабелю, можливістю відладки складеного алгоритму діагностування, внесення необхідних базових даних та програмних змін.

4.3. Розробка алгоритму роботи системи діагностування силового кабелю

Блок-схема алгоритму функціонування мікроконтролера представлена на рис. 4.3.

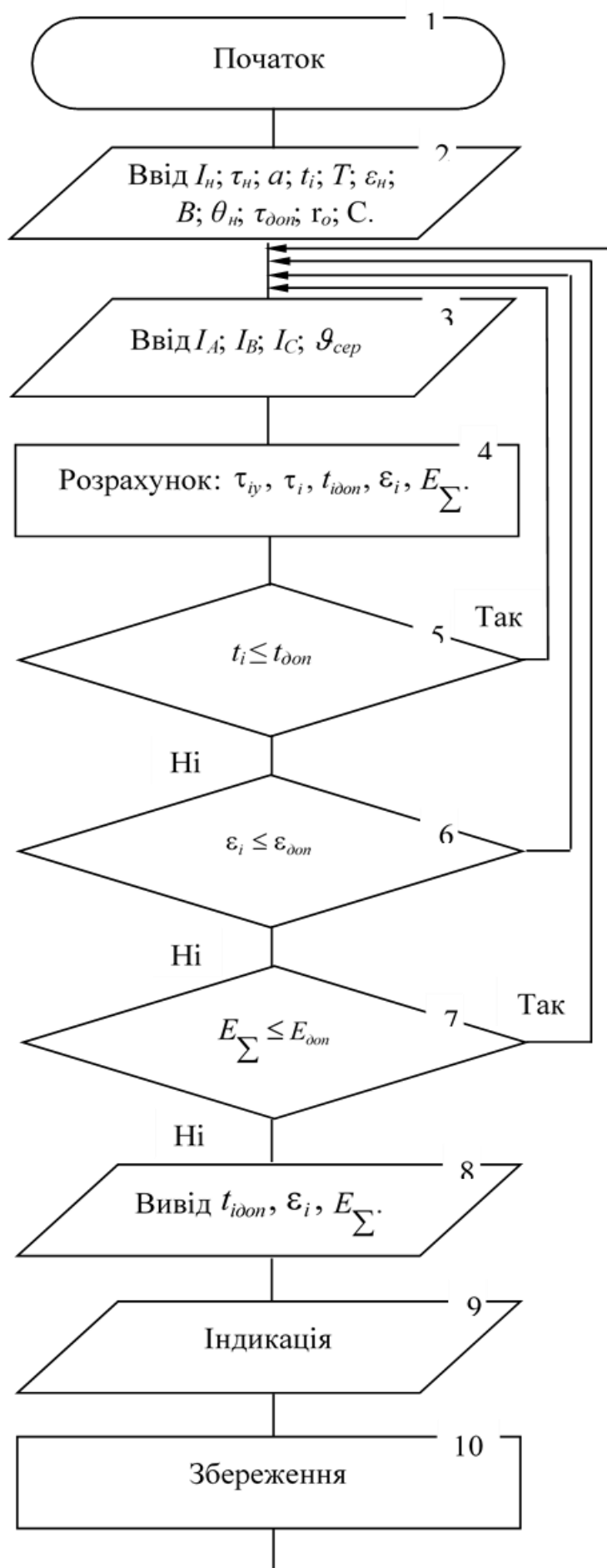


Рисунок 4.3 - Алгоритм роботи пристрою діагностування

4.4 Висновки до розділу 4

1. Встановлено критеріальні параметри діагностики силового кабеля якими являються швидкість теплового зносу ізоляції та загальний обсяг теплового зносу ізоляції кабелю.
2. Створено схему системи діагностики силового кабеля.
3. Розроблено математичну модель для діагностування експлуатаційних режимів роботи силового кабеля.
4. Сформовано структурну схему пристрою для дистанційного діагностування силового кабеля.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Силові кабелі піддаються впливу різноманітних факторів експлуатації, таких як графік навантаження, температура навколишнього середовища, перевантаження, пускові струми електродвигунів, струми короткого замикання, комутаційні перенапруги та вологість. Аналіз механізму пошкодження основних елементів конструкції силового кабелю, зокрема його ізоляції, вказує на те, що ізоляція є найбільш уразливим елементом. Одержані результати свідчать, що руйнування ізоляції силового кабелю відбувається під впливом нагріву, механічних зусиль (тиск, вібрації, удари), вологості та агресивних середовищ.

Висновок з аналізу результатів дослідження витрат ресурсу ізоляції силового кабелю свідчить про те, що форма графіка навантаження значно впливає на сумарний тепловий знос ізоляції за цикл роботи. Збільшення форми графіка навантаження може призвести до значного збільшення добового теплового зносу ізоляції силового кабелю.

Розроблена математична модель діагностування функціонального стану силового кабелю, а також структурна схема системи та пристрою для дистанційного діагностування силового кабелю. Запропонований пристрій для функціонального діагностування дозволяє контролювати температуру проводу фаз, тривалість перевантажень, швидкість теплового зносу ізоляції обмоток, а також сумарний тепловий знос.

Отримані результати визначення критеріїв діагностики та розробка пристрою дистанційного діагностування можуть бути корисними для оптимізації експлуатаційних режимів силових кабелів з метою ресурсозбереження та запобігання аварійним ситуаціям.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Надёжность асинхронных двигателей / Под ред. Б. Н. Ванеева. – К.: Техніка, 1983. – 143с.
2. Овчаров В.В. Эксплуатационные режимы работы и непрерывная диагностика электрических машин в сельскохозяйственном производстве / В.В. Овчаров // – К.: УСХА, 1990. – 168 с.
3. Ермолаев С.А. Эксплуатация и ремонт электрооборудования и средств автоматизации в системе АПК / С. А. Ермолаев, В.А. Мунтян., В.Н. Кюрчев // – К.: Альтур, 1997. – 414с.
4. Буторин С.Я. Определение мест повреждения в кабельных линиях электропередачи. - Харьков: ХВВКУ, 1974. - С.154.
5. ”Електротехнічні системи електроспоживання” усіх форм навчання / Укл.: П.Г. Плешков, А.Г. Котиш, А.Ю. Орлович. – Кіровоград: КДТУ, 2004. – 133.с.
6. Калитвянский В.И. Общие закономерности теплового старения полимерных диэлектриков / В.И. Калитвянский // Электричество. – 1955. – № 3. – С, 57 – 61.
7. Надійність електроенергетичних систем і електричних мереж: підручник /А. В. Журахівський, С. В. Казанський, Ю. П. Матєєнко, О. Р. Пастух. – Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. – 456 с
8. Бахрушин В.Є. Математичні основи моделювання систем: Навчальний посібник для студентів. - Запоріжжя: Класичний приватний університет, 2009. – 224 с.
9. Мартинюк П.М., Федорук Н.А. Теорія систем та математичне моделювання: Навчальний посібник. – Рівне: Національний університет водного господарства та природокористування, 2009. – 226 с.
10. Денисенко М.А. Спеціальні питання електропостачання: навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2009 – Ч. I.: Вибір елементів електропостачальних систем на основі стохастичного моделювання процесів,

що відбуваються в них. - 288 с.

11. Пекур П.П., Новак А.С. Еквівалентна розрахункова схема ввімкнення ВЕС до електросистеми // Міжнародний науково-технічний журнал молодих вчених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми електроенергетики та автоматики». – 2016.

12. Городецький С.С., Кулакова Р.В. Исследование нагрева проводов с резиновой изоляцией // Бюллетень ВЭИ. 1940.- №4. -359 с.

13. Кирик В. В. Електричні мережі та системи: підручник /В.В. Кирик. - Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. - 324 с. ISBN 978-966-990-031-9

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

15. Широков О.Г., Зализный Д.И. Тепловые схемы замещения электроэнергетический устройств // Наукоемкие технологии. – 2008. - №2. – с. 63-67.

16. Кирик В.В. Електричні системи та мережі: Методичні вказівки до виконання контрольних робіт. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2008 – Ч.І. – 68 с.

17. Система пошуку кабельної продукції. – Режим доступу: <https://kps.ru/spravochnik/kabeli-silovyye/s-bumajnoi-izolyaciei/aashv-10kv/kabel-aashv-3x35.html>

18. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pogoda.meta.ua/Kirovohradska/Kirovohradskyi/Kirovohrad/2010-06-09/>

19. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pogoda.meta.ua/Kirovohradska/Kirovohradskyi/Kirovohrad/2010-01-09/>

20. Безменнікова Л.М., Переверзєв Д.М. Пристрій діагностування експлуатаційних режимів роботи силового трансформатора // Матеріали

науково-технічної конференції магістрів та студентів ТДАТА. - Вип.1, том 2. - Мелітополь: ТДАТА, 2006. - С.18-19.

21. Безменникова Л.Н. Устройство функционального диагностирования силовых трансформаторов. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету / Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика. – Днепродзержинск: ДДТУ, 2007. - С.467-468.

22. Вдовико В.П. Методология системы диагностики электрооборудования высокого напряжения. Электричество, № 2, 2010. – С. 14 - 20.

23. Жидецкий В. Ц., Джигирей В. С, Сторожук В. М. та ін. Практикум із охорони праці. Навчальний посібник / За ред. канд. техн. наук, доцента В. Ц. Жидецького. – Львів, Афіша, 2000 – 352 с.

ДОДАТКИ

Додаток А. ОХОРОНА ПРАЦІ

А.1 Охорона праці на кабельних лініях напругою 0,4-10 кВ

А.1.1 Загальні положення.

До роботи допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли медичний огляд, вступний інструктаж, інструктаж на робочому місці, успішно склали іспити з правил охорони праці, пожежної безпеки і отримали посвідчення про допуск до роботи.

Нагляд за кабельними лініями і їх трасами здійснюється у вигляді періодичних обходів і ремонтів спеціально виділеними монтерами, а також інженерно-технічним персоналом, який відповідальний за стан і експлуатацію кабельних ліній, по раніше складеним і затвердженим графікам ВГЕ.

Огляди кабельних ліній проводяться за графіком в наступні терміни:

Трас кабелів, що прокладені в ґрунті, по естакадах, в тунелях, блоках, каналах, галереях і по стінам споруд — за місцевими інструкціями, але не рідше одного разу в 3 місяці

Кінцевих муфт на лініях, напругою вище 1000В — один раз у шість місяців, на лініях напругою 1000В і нижче — один раз на рік. Кабельних колодязів — два рази на рік. Підводних кабелів — у відповідності з місцевими інструкціями.

Терміни оглядів кабельних ліній інженерно-технічним персоналом устанавлюються з урахуванням місцевих умов.

В період паводків і після злив проводяться внечергові обходи і огляди.

Канали і інші споруди кабельних ліній повинні утримуватись в чистоті: кабелі і металеві конструкції, на яких вони прокладені, повинні бути пофарбовані антикорозійними сполуками.

Інструкція складена у відповідності з ПТЕ, директивних та інших керуючих матеріалів по експлуатації силових кабельних ліній 0,4-10 кВ з урахуванням досвіду і місцевих умов [23].

А.1.2 Вимоги перед початком роботи.

Ремонт кабельних ліній повинен проводитися за графіком, який розроблений на основі оглядів і випробувань і затверджений відповідальним за електрогосподарство.

Ремонт кінцевих муфт (зділок) кабеля на збірках виконується при повному відключенні і заземленні збірок (комірок).

Розкопи кабельних трас або земляні роботи поблизу них повинні проводитися тільки з дозволу експлуатуючої організації. При цьому повинен бути забезпечений нагляд за зберіганням кабелів на весь період виробництва робіт, а розкриті кабелі повинні бути закріплені для запобігання провисання і захисту їх від механічних ушкоджень. На місці роботи повинні бути встановлені сигнальні вогні і попереджувальні плакати.

Виробникові робіт повинно бути вказане точне місце знаходження кабелів, з'ясований порядок поводження з ними. Він, в свою чергу, повинен дати розписку, що підтверджує отримання вказаних відомостей.

Особлива увага повніша бути звернена на розкопи, що проводяться механізованим способом, в залежності, від способу виконання робіт і засобів механізації, повинні бути вжиті необхідні заходи захисту кабелів від механічних пошкоджень.

При виявленні під час розкриття земляної траншеї трубопроводів, невідомих кабелів та інших комунікацій, що не вказані у схемі, необхідно припинити роботи, довести до відома особи, яка відповідальна за енергогосподарство для одержання відповідних вказівок.

Рити траншеї і котловани в місцях знаходження кабелів і підземних споруд необхідно з особливою обережністю, а починаючи з глибини 0,4 м, — тільки за допомогою лопат, використання ломів або інших інструментів забороняється.

Розкопки землерийними машинами на відстані ближче 1 м від кабеля, а також використання відбійних молотків для розпушування ґрунтів над кабелями

на глибину більше 0,4 м при нормальній глибині прокладки кабелів не допускається.

Перед початком роботи під наглядом електротехнічного персоналу повинно бути встановлене тимчасове огороження, яке визначає межу роботи будівельних машин. При пропалюванні кабельних лівій, які прокладені в приміщенні, тунелях повинен здійснюватися нагляд за кабелями в кабельних спорудах, з дотриманням правил техніки безпеки.

Відкрито прокладені кабелі, а також всі кабельні муфти і заділок повинні бути забезпечені бирками з позначками:

— на бирках кабелів — марки, напруги, перетину, номери або найменування;

— на бирках муфт — дати монтажу і прізвище монтера, що проводить роботу. Бирки повинні бути стійкими у відношенні впливу навколишнього середовища.

А.1.3 Вимоги під час виконання робіт.

Роботи на кабельних лініях напругою 0,4-10 кВ проводяться по наряду-допуску не менше чим двома особами, одна з яких повинна мати групу з електробезпеки не нижче IV.

Перед тим, як приступити до ремонту кабеля, необхідно перевірити відсутність напруги шляхом проколу його струмоведучих жил. Переконавшись у відсутності напруги на кабелі, можна приступати до його ремонту.

Виконати електромонтеру-майстру необхідно: Одяг і діелектричні рукавички та захисні окуляри. Стати на суху дошку або гумовий килим.

При різанні кабеля ножівкою остання повинна бути заземлена.

Різання кабеля проводити обережно, тримаючи ножівку за дерев'яну ручку, не торкаючись металевих частин.

Користуючись паяльною лампою при ремонті кабеля, необхідно користуватися інструкцією з охорони праці «При роботі з паяльною лампою».

Кабельну мастику розігрівати в стороні від місця ремонту кабеля в закритій посудині, періодично помішуючи, при цьому електромонтер повинен бути в захисних окулярах і на руки надіти брезентові рукавиці.

Розплавлена кабельна мастика заливається в муфту з підвітряної сторони за 3-4 прийома, з інтервалом 10-20 хв. відповідно.

А.1.4. Вимоги по закінченню робіт.

Виявлені при оглядах неполадки повинні заноситися в журнал дефектів і неполадок для подальшого їх усунення.

Після закінчення роботи необхідно:

Привести у порядок своє робоче місце, інструмент і пристосування.

Доповісти керівникові робіт про закінчення робіт.

А.1.5. Вимоги при аварійних ситуаціях.

5.1. При появі небезпеки, яка загрожує аварією або нещасним випадком, електромонтер зобов'язаний припинити роботу, повідомити про це майстру або іншому ІТП дільниці і прийняти негайно заходи по ліквідації аварійної ситуації.

5.2. При нещасному випадку необхідно зупинити роботу, викликати негайно швидку допомогу, повідомити майстра, виконроба або начальника дільниці, подати першу допомогу потерпілому, зберегти на робочому місці обстановку і стан устаткування такими, якими вони були на момент події, нещасного випадку. Аналогічно зробити при аварії.

А.1.6 Відповідальність.

За порушення правил охорони праці і вимог дійсної інструкції електромонтер несе відповідальність у порядку, встановленому законодавством і правилами внутрішнього трудового розпорядку.

А.2 Охорона праці при монтажі кабелів

При прокладенні кабелю вручну маса ділянки кабелю, що доводиться на одного дорослого робітника, не повинна перевищувати для чоловіків 35 кг і для жінок 20 кг. В місцях розташування підземних комунікацій до земляних робіт приступають тільки за наявності письмового дозволу організацій, відповідальних за експлуатацію цих комунікацій. Поблизу підземних комунікацій (наприклад, трубопроводів) земляні роботи ведуть під безпосереднім спостереженням виробника робіт або майстра, а поблизу діючих кабелів, крім того, під спостереженням відповідального працівника енергосистеми, що експлуатує ці кабелі.

Користування ударними інструментами (ломи, кирки, клини, пневмоінструмент), а також землерийними машинами поблизу діючих підземних комунікацій (електричні кабельні лінії, газопроводи, напірні трубопроводи та ін.) забороняється. Якщо при роботах виявляють не передбачені в плані траси підземні комунікації, то земляні роботи негайно припиняють аж до з'ясування і отримання відповідного дозволу. Кабелі і муфти, виявлені при виробництві земляних робіт, підлягають захисту щитами і плакатами, застережливими про наявність напруги і небезпеки для життя.

При спуску барабанів з платформ або автомашин не допускається присутність людей поблизу похилих жердин. При прогріванні кабелю електричним струмом не допускається застосування напруги понад 250 В. Силові трансформатори, зварювальні і інші машини, використовувані при прогріванні на напругу понад 36 В, підлягають заземленню разом з металевою оболонкою кабелю.

Огляд колодязів, тунелів, колекторів і роботи в них повинні робитися не менше чим двома особами. Колодязь або тунель при відкритті люка має бути провентильований. До роботи в колодязях і тунелях можна приступати тільки у тому випадку, якщо не буде виявлений газ (наявність або відсутність газу встановлюють спеціальні служби підприємства). При роботах в колодязях,

тунелях і колекторах допускається використання переносних ламп напругою не понад 12 В. Кабельні закладення монтують із застосуванням епоксидного компаунда і спеціальних лаків № 1 і 2 лише електромонтери, що пройшли попередній інструктаж.

Кабельну масу і припій розігрівають, цю масу заливають в муфту обов'язково у брезентових рукавицях і захисних окулярах.

До електричних випробувань кабелю приступають, перевіривши відсутність на ній напруги (у необхідних випадках кабель заземляють).

А.3 Охорона праці при експлуатації кабелів

До ремонту кабельних ліній допускається персонал після навчання і перевірки знань по безпечних методах роботи і отримання відповідного документу. Розкопку траншей або котловану в місцях проходження кабелів ведуть вручну за допомогою лопати, дотримуючись особливої обережності, починаючи з глибини 0,4 м Котловани (особливо глибокі) міцно зміцнюють і захищають, а в нічний час освітлюють ліхтарями з червоним склом.

У місцях переходу над траншеями мають бути влаштовані пішохідні містки. Перекладання або зрушення кабелів і муфт допускаються тільки після їх відключення.

Особливу небезпеку представляють роботи по монтажу кінцевих закладень і сполучних муфт із застосуванням паяльних ламп, газових пальників, термітних патронів, а також роботи при зварюванні. Епоксидна смола, розчинники, заливальні маси є токсичними і горючими матеріалами. При роботі *руки захищають* спец рукавичками; при зварюванні очі захищаються спец окулярами з темним склом. Особливо обережно розігрівають і переміщають розігріту кабельну масу, що має в розплавленому стані високу температуру.

Газові пропан-бутанові, ацетилено-кисневі або бензино-кисневі установки мають бути видалені на необхідну відстань від місця роботи.

А.4 Охорона праці при ремонті кабелів

Важлива умова забезпечення безпеки персоналу при ремонті кабелів — виконання робіт по нарядах і не менше чим двома особами. Ремонтні роботи дозволяється проводити лише після усебічного відключення ремонтованого кабелю, перевірки на його кінцях відсутності напруги н вивішування в місцях, звідки може бути подана напруга на ремонтований кабель, плакатів *«Не включати — працюють люди»*.

При ремонті кабельних ліній доводиться іноді розрізати кабель або розкривати муфту. Такі роботи можна виконувати, переконавшись заздалегідь в тому, що кабель не знаходиться під напругою. Перевірку здійснюють спеціальними проколювачем, забезпеченим ізолюючою штангою. При ремонтних роботах в кабельних спорудах (колекторах, тунелях, каналах і т. п.), а так само при земляних роботах по розкопці кабельних трас в цих місцях може виникнути газ. Тому до початку робіт, користуючись спеціальним приладом, встановлюють відсутність шкідливих для дихання газів. При їх виявленні робітники не допускаються до робіт, поки газ не буде усунений.

Щоб уникнути пожеж при ремонті кабелів розігрівати кабельну масу і заправляти бензином паяльну лампу дозволяється тільки поза кабельними спорудами. При випробуваннях силових кабелів постійним струмом підвищеної напруги від кенотронної установки її необхідно захистити і до початку випробувань видалити з місця робіт людей. Випробувальну установку перед включенням заземляють. Приєднувати і випробовувати кабелі слідє в діелектричних рукавичках, стоячи на ізолюючій основі. Після закінчення випробування кабелів постійним струмом усі жили кабелю розряджають від накопиченого електричного заряду через обмежувальний опір, передбачений для цієї мети в кенотронних установках.